



Correntes de superfície medidas por RADAR HF entre o Cabo Raso e o Cabo Espichel: Previsão Operacional de Correntes de Maré

Teotónio José Pires Barroqueiro

Mestrado em Ciências Geofísicas
Área de Especialização em Meteorologia e Oceanografia

Dissertação orientada por:
Prof. Dr. Joaquim Dias (DEGGE/FCUL)

Aos meus pais.

Agradeço ao Professor Doutor Joaquim Dias pela cuidadosa atenção com que orientou a minha curiosidade sem a limitar.

Agradeço ao Comandante Santos Martinho pela constante inspiração e pela extraordinária generosidade intelectual: muito do mérito desta investigação deve-se aos seus cirúrgicos comentários.

Agradeço aos Comandantes Santos Fernandes e Quaresma dos Santos, aos Dr.s José Paulo Pinto e João Vitorino e às Dr.as Marina Serpa e Luísa Lamas por me concederem o privilégio de escutar o seu saber no esclarecimento das minhas dúvidas, dispondo do seu tempo para me ajudarem.

Agradeço ao Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa, em especial à Engenharia Oceanográfica da Divisão de Oceanografia, pelo apoio incondicional durante estes mais de dois anos de dedicação quase exclusiva ao mestrado na Universidade de Lisboa.

Agradeço à minha família pela compreensão nos meus momentos de luar junto ao mar.

Resumo

A Previsão Operacional de Correntes Costeiras permite conhecer as condições garantes da segurança e sucesso das operações e atividades marítimas, quer no âmbito militar, quer civil, nomeadamente: na busca e salvamento, no combate à poluição, no apoio à hidráulica e na gestão portuária, nas operações militares especiais, no combate ao narcotráfico, na pesca, na navegação de recreio e no tráfego marítimo, e consequentemente na salvaguarda da vida humana no mar.

Desde 2012, a Marinha Portuguesa mantém operacional o Sistema de Monitorização Operacional das Correntes Costeiras (SIMOC), que garante a monitorização remota das correntes de superfície e da agitação marítima, entre o Cabo Raso e o Cabo Espichel, dos 3 aos 90 km da costa. O acervo de dados resultantes deste sistema permite hoje avançar para o desenvolvimento de diferentes modelos de assimilação e deriva de aplicação em todo o espectro de usos do mar, o que exige o processamento, análise e interpretação das medições do campo vetorial das correntes de superfície obtidas pelos radares costeiros de alta-frequência (RADAR HF) do projeto SIMOC.

O objetivo desta investigação é prever a corrente de maré entre o cabo Raso e o cabo Espichel, a partir da análise harmónica da corrente de superfície medida pelo sistema de RADAR HF São Julião – Espichel. Atingir este objetivo impõe: descrever as dimensões e características físicas da corrente de maré, reconhecer as propriedades do sinal da corrente de superfície que possibilitam o seu processamento matemático, calcular e interpretar a contribuição da maré na corrente de superfície, e avaliar os desafios que se põem diante da previsão operacional das correntes costeiras.

Foram processadas e analisadas as medições da velocidade da corrente superficial medida por RADAR HF, na área geográfica limitada pelos meridianos e paralelos, respetivamente: 009.75°W e 009.15°W, e 38.3°N e 38.75°N, no tempo decorrido entre 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2015. Foram ainda analisados períodos sazonais multianuais, entre 2013 e 2017, de especial interesse de forçamento astronómico, bem como períodos de duração variável entre 24 e 720 horas, em 2015, de especial interesse de forçamento meteorológico da corrente de superfície.

O processamento dos dados visou analisar a componente relativa à maré nas medições da velocidade da corrente superficial medida por RADAR HF, e prever a corrente de maré a partir das constituintes harmónicas calculadas.

Com o propósito de resolver o sistema de equações definido pela análise harmónica das correntes de maré, os dados de corrente de superfície foram processados com a função UTide (Codiga, 2011) com dois métodos de regressão linear distintos, a saber: método dos mínimos quadrados ordinários (MMQ) e método dos mínimos quadrados ponderados (MMQP). Aplicou-se o MMQP com o propósito de melhorar os intervalos de confiança da solução obtida por comparação com o MMQ. Para tal, o autor adaptou e desenvolveu a formulação da função de ponderação do MMQP com a soma da covariância normalizada aos resíduos da regressão linear para garantir que as medições da corrente de superfície com menor covariância, logo maior certeza, fossem privilegiadas na regressão linear pelo MMQP.

A análise harmónica da corrente de superfície com o método dos mínimos quadrados ponderados com o desvio padrão normalizado das componentes zonal e meridional das medições da corrente medida pelo sistema RADAR HF São Julião – Espichel reduziu o intervalo de confiança comparado quer com o resultante da análise harmónica com o método dos mínimos quadrados ordinários, quer com o resultante da análise harmónica com o método dos mínimos quadrados ponderados com a função de pesos *cauchy*, como proposta por Codiga (2011).

A redução do intervalo de confiança com o método dos mínimos quadrados ponderados com o desvio padrão normalizado das componentes zonal e meridional da corrente medida mostra quão promissor pode ser este método se devidamente parametrizado e empiricamente validado.

A previsão operacional da corrente costeira na área de estudo (AOI), em particular da sua componente de maré, implica reconstruir o sinal da corrente a partir das constituintes calculadas na análise harmónica da corrente de superfície medida pelo sistema de RADAR HF São Julião – Espichel. Uma vez que as principais constituintes diurnas (K1 e O1) se mostram contaminadas pela corrente radiacional, não devem ser incluídas na reconstrução da corrente de maré. Logo, o maior desafio que se põe diante da previsão operacional da corrente costeira na AOI, a par das pontuais falhas, temporais e espaciais, das medições do sistema de RADAR HF São Julião – Espichel, é a filtragem da corrente de superfície radiacional periódica de forçamento externo. Esta filtragem permite o cálculo das principais constituintes diurnas da corrente de maré, melhorando, assim, a reconstrução do sinal desta corrente, e consequentemente a previsão operacional da corrente costeira.

Palavras-chave: Oceanografia Costeira, Correntes de Maré, RADAR HF, Previsão Operacional, Análise Harmónica.

Abstract

The Operational Forecast of Coastal Currents allows to know the conditions guaranteeing the safety and success of maritime operations and activities, both in the military and civil scopes, namely: search and rescue, marine pollution control, port and hydraulic infrastructure management, special military operations, drug trafficking control, fishery activities, recreational navigation and maritime traffic, and consequently in safeguarding human life at sea.

Since 2012, the Portuguese Navy has been operating the Coastal Current Operational Monitoring System (SIMOC), which ensures the remote monitoring of surface currents and wave conditions between Cabo Raso and Cabo Espichel, from 3 to 90 km from the coast. The data collection resulting from this system allows us today to advance to the development of different models of assimilation and drift with application in the whole spectrum of sea uses, which requires the processing, analysis and interpretation of the measurements of the surface currents vector field obtained by the SIMOC project high-frequency coastal radars (HF RADAR).

The main purpose of this research is to predict the tidal current between Cabo Raso and Cabo Espichel, based on the harmonic analysis of the surface current measured by the HF RADAR São Julião - Espichel system. Achieving this objective requires: to describe the physical dimensions and characteristics of the tidal current, to recognize the surface current signal properties that enable its mathematical processing, to calculate and to interpret the tidal contribution in the surface current, and to evaluate the challenges to the operational forecast of coastal currents.

HF RADAR surface current velocity data measurements were processed and analyzed in the geographic area bounded by meridians and parallels, respectively: 009.75°W and 009.15°W , and 38.3°N and 38.75°N , in time between January 1 and December 31, 2015. Multi-year seasonal periods between 2013 and 2017 were also analyzed, those of special interest in astronomical forcing, as well as periods of variable duration between 24 and 720 hours in 2015, those of special interest to meteorological forcing of the surface current.

The data processing was aimed at analyzing the tidal component in the measurements of the surface current velocity measured by HF RADAR, and to predict the tidal current from the calculated harmonic constituents.

In order to solve the system of equations defined by the harmonic analysis of the tidal currents, the surface current data were processed using the UTide (Codiga, 2011) function with two distinct linear regression methods, namely: least squares (OLS) and weighted least squares method (WLS). The WLS was applied with the purpose of improving the confidence intervals of the solution obtained by comparison with the OLS. For this, the author adapted and developed the formulation of the weighting function of the WLS with the sum of the covariance normalized to the residuals of the linear regression to ensure that the measurements of the surface current with less covariance, thus greater certainty, were favored in the linear regression by WLS.

The harmonic analysis of the surface current with the weighted least squares method with the normalized standard deviation of the zonal and meridional components of current data measured by the HF RADAR São Julião - Espichel system reduced the confidence interval compared to the result of the analysis harmonic with the ordinary least squares method, and to the result of harmonic analysis with the weighted least squares method weighted with the *cauchy* weighting function, as proposed by Codiga (2011).

The decrease of the confidence interval with the weighted least squares method with the normalized standard deviation of the zonal and meridional components of the measured current shows how promising this method can be if properly parameterized and empirically validated.

The operational prediction of the coastal current in the study area (AOI), in particular its tidal component, involves reconstructing the current signal from the constituents calculated in the harmonic analysis of the surface current measured by the HF RADAR São Julião - Espichel system. Since the main diurnal constituents (K1 and O1) are contaminated by the radiational current, they should not be included in the reconstruction of the tidal current signal. Therefore, the greatest challenge facing the operational forecast of the coastal current in the AOI, together with the occasional time and space failures of the measurements of the HF RADAR São Julião - Espichel system, is the filtering of the periodic radiative surface current due to external forcing. This filtering allows to calculate the main diurnal constituents of the tidal current, thus improving the reconstruction of the signal of this current, and consequently the operational forecast of the coastal current.

Keywords: Coastal Oceanography, Tidal Currents, HF RADAR, Operational Forecasting, Harmonic Analysis.

Índice

Agradecimentos	i
Lista de quadros	vi
Lista de figuras	vii
Lista de abreviaturas, siglas e símbolos	x
1 Introdução	1
1.1 Medição de corrente de superfície por RADAR HF	4
1.2 Corrente induzida pela maré	7
1.3 Análise Harmónica da corrente de maré	8
1.4 Objetivos e sinopse	9
2 Dados e Metodologia	13
2.1 Dados de corrente de superfície (RADAR HF)	13
2.2 Dados de vento	17
2.3 Dados de batimetria	19
2.4 Dados astronómicos	19
2.5 Processamento dos dados de corrente de superfície	20
2.6 Análise harmónica: método dos Mínimos Quadrados Ponderados	21
2.7 Estatística direcional da corrente de maré	23
2.8 Dados de previsão da corrente de maré	24
3 Processamento dos dados e Discussão dos resultados	26
3.1 Do vento	26
3.2 Da corrente de superfície (RADAR HF)	29
3.3 Da batimetria	35
3.4 Análise harmónica: testes com diferentes métodos dos Mínimos Quadrados	36
3.5 Estatística direcional da corrente de maré	38
3.6 Da previsão da corrente de maré	41
4 Conclusões	49
Referências bibliográficas	51

Lista de quadros

2.1	Equinócios de 2013 a 2017 e Perigeus lunares mais próximos (UTC).	19
2.2	Novilúnios de 2014 e 2015 (UTC).	20
3.1	Norma do vector médio das fases por constituinte harmónica.	38

Lista de figuras

Figura 1.1	Localização das estações RADAR HF do sistema de monitorização ambiental mantido pelo Instituto Hidrográfico.	2
Figura 1.2	Localização das estações RADAR HF do projeto SIMOC.	2
Figura 1.3	Estação radar costeira de alta frequência de São Julião (JSLM)	3
Figura 1.4	Estação radar costeira de alta frequência do cabo Espichel (EPSM)	3
Figura 1.5	Representação da corrente de superfície medida pelo SIMOC na área coberta pelas estações RADAR HF JSLM e EPSM	4
Figura 1.6	Proposta de um sistema de previsão operacional de corrente de maré (Passo 1). . .	11
Figura 1.7	Proposta de um sistema de previsão operacional de corrente de maré (Passo 2). . .	12
Figura 2.1	Grelha de dados RADAR HF São Julião - Espichel. A encarnado os pontos da AOI. . .	14
Figura 2.3	Grelha de dados RADAR HF com menor mediana $ \Delta U \Delta V $	14
Figura 2.2	Grelha de dados RADAR HF sobre a linha de base.	15
Figura 2.4	Grelha de dados RADAR HF com maior mediana $ \Delta U \Delta V $	16
Figura 2.5	Pontos de interesse sobre a batimetria da AOI.	17
Figura 2.6	Grelha de dados ERA-Interim.	18
Figura 2.7	Geometria do sinal de <i>backscatter</i> do radar.	22
Figura 2.8	Grelha de dados de corrente de maré (UTide).	25
Figura 3.1	Densidade espectral de potência (Welch), por componentes meridional (v_{10}) e zonal (u_{10}), do vento à superfície (10 metros) na posição 38.75°N - 009.75°W durante o ano 2015.	27
Figura 3.2	Média móvel de 24 horas do vento a 10 metros (38.75°N - 009.75°W - 2015). . .	28
Figura 3.3	Média móvel de 15 dias do vento a 10 metros (38.75°N - 009.75°W - 2015). . .	28
Figura 3.4	Média móvel de 30 dias do vento a 10 metros (38.75°N - 009.75°W - 2015). . .	29
Figura 3.5	Cobertura temporal da medição da corrente de superfície pelo RADAR HF na AOI (2015).	29
Figura 3.6	Histograma da variação temporal da cobertura espacial das medições RADAR HF (2015).	30
Figura 3.7	Corrente de superfície no POI 588 (2015).	31
Figura 3.8	Corrente de superfície no POI 758 (2015).	31
Figura 3.9	Corrente de superfície no POI 789 (2015).	32
Figura 3.10	Corrente de superfície no POI 426 (2015).	32
Figura 3.11	Corrente de superfície no POI 575 (2015).	33
Figura 3.12	Corrente de superfície no POI 87 (2015).	33
Figura 3.13	Corrente de superfície no POI 802 (2015).	34

Figura 3.14 Batimetria da AOI. Ver legenda da figura no corpo desta secção.	35
Figura 3.15 Declive da batimetria da AOI.	36
Figura 3.16 Comparação dos resultados da análise harmónica da M2 por MMQ, e MMQP com função de ponderação cauchy e cauchy modificada (CQAL) (maré equinocial de março de 2015 no POI 702).	37
Figura 3.17 Comparação dos resultados da análise harmónica da K1 por MMQ, e MMQP com função de ponderação cauchy e cauchy modificada (CQAL) (maré equinocial de março de 2015 no POI 702).	38
Figura 3.18 Pontos com menor (a) e maior (b) dispersão angular da fase da M2 (lunações 2014 e 2015). A norma e o ângulo dos vectores representados são, para a constituinte harmónica indicada no título do gráfico, respectivamente, a dimensão do semieixo maior da elipse de corrente de maré e a fase. A magnitude do vector é expressa em cm/s.	39
Figura 3.19 Pontos com menor e maior dispersão angular da fase da K1 (lunações 2014 e 2015).	40
Figura 3.20 Dispersão angular das fases da M2 (lunações 2015).	40
Figura 3.21 Dispersão angular das fases da K1 (lunações 2015).	41
Figura 3.22 Comparação do erro da previsão da corrente de maré com a direcção e velocidade do vento (maré equinocial vernal de 2015).	42
Figura 3.23 Densidade espectral de potência (Welch) da corrente residual no POI 702 (maré equinocial vernal de 2015).	43
Figura 3.24 Análise de ondulas da corrente residual da maré equinocial vernal de 2015, no POI 702.	44
Figura 3.25 Comparação das previsões da corrente (POI 702) e da altura da maré (Cascais), para abril de 2015. As circunferências a preto, encarnado e verde representam, respectivamente, os extremos da altura de maré (baixa e preia-mar, a velocidade máxima da corrente de maré e a velocidade mínima da corrente de maré.	45
Figura 3.26 Diferença temporal entre corrente e altura de maré no POI 821 (abril de 2015). As circunferências a encarnado representam o instante da velocidade máxima da corrente de maré no POI 821.	45
Figura 3.27 Elipses da corrente de maré semidiurna M2 (2015), sobre a batimetria.	46
Figura 3.28 Elipses da corrente de maré diurna K1 (2015), sobre a batimetria.	46
Figura 3.29 Energia cinética da corrente de maré semidiurna M2 e diurna K1 (2015).	47
Figura 3.30 Número de forma da corrente de maré na AOI (abril de 2015). A maré é considerada semidiurna, mista e diurna, se o número de forma é, respetivamente, inferior a 0.25, entre 0.25 e 3, e superior a 3.	47
Figura 3.31 Comparação da velocidade da corrente de maré em águas vivas e em águas mortas na AOI (abril de 2015).	48
Figura 3.32 Diferença de fase entre as constituintes harmónicas M2 e K1 da corrente de maré e da altura de maré na AOI (2015).	48

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

AOI – Área de interesse

CODAR – *Coastal Ocean Dynamics Applications Radar*

CQAL – *Covariance quality factor* ($\Delta U \Delta V$)

ECMWF – Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo

MMQ – Método dos Mínimos Quadrados Ordinários

MMQP – Método dos Mínimos Quadrados Ponderados

NOAA – *National Oceanic and Atmospheric Administration*

POI – Ponto de interesse

RADAR HF – Radares costeiros de alta frequência

SIMOC – Sistema de Monitorização Operacional das Correntes Costeiras

W10 – Vento a 10 metros da superfície

FFT – Transformada rápida de Fourier

JLSM – Estação radar costeira de alta frequência de São Julião

EPSM – Estação radar costeira de alta frequência do cabo Espichel

Qual deles, a Terra ou o Sol gira em redor do outro, é-nos profundamente indiferente. A bem dizer, é um assunto fútil.

Albert Camus, *O Mito de Sísifo*

Capítulo 1

Introdução

A Previsão Operacional de Correntes Costeiras permite conhecer as condições garantes da segurança e do sucesso das operações e atividades marítimas, quer no âmbito militar, quer civil, nomeadamente: na salvaguarda da vida humana no mar, no combate à poluição, na gestão e obras portuárias, na pesca, na navegação de recreio, nas operações militares especiais, e no tráfego marítimo, em geral.

Em 2012, a Marinha Portuguesa concluiu a implementação do Sistema de Monitorização Operacional das Correntes Costeiras (SIMOC), com o objetivo de monitorizar remotamente as correntes de superfície e a agitação marítima, entre o cabo Raso e o cabo Espichel, dos 3 aos 90 km da costa. O SIMOC permite, de modo inédito, uma visão sinóptica das correntes de superfície costeiras por períodos longos e contínuos.

O acervo de dados resultantes deste sistema permite hoje avançar para o desenvolvimento de diferentes modelos de assimilação e deriva de aplicação em todo o espectro de usos do mar (Wyatt, 2007), uma ambição primeva do SIMOC. Esta ambição exige o processamento, análise e interpretação das medições do campo vetorial da corrente de superfície obtida pelos radares costeiros de alta-frequência (RADAR HF) deste sistema de monitorização operacional.

O objeto de estudo desta dissertação é a corrente de superfície, em especial a sua componente periódica de maré, entre o cabo Raso e o cabo Espichel, medida desde 2012 pelos radares costeiros de alta-frequência *SeaSonde* 12.4 MHz da *Coastal Ocean Dynamics Application Radar* (CODAR) instalados no Forte de São Julião da Barra (na foz do rio Tejo), e no farol do cabo Espichel (ver figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4).

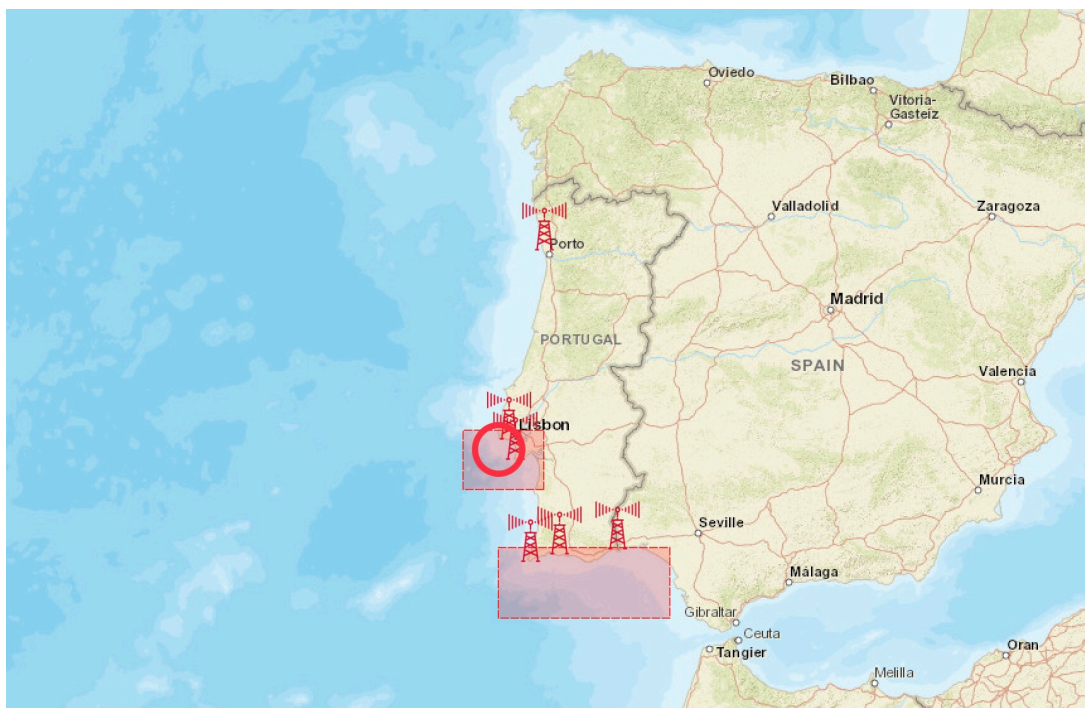


Figura 1.1: Localização das estações RADAR HF do sistema de monitorização ambiental mantido pelo Instituto Hidrográfico. A circunferência a encarnado indica a área de estudo desta dissertação. Imagem cedida pelo Instituto Hidrográfico.

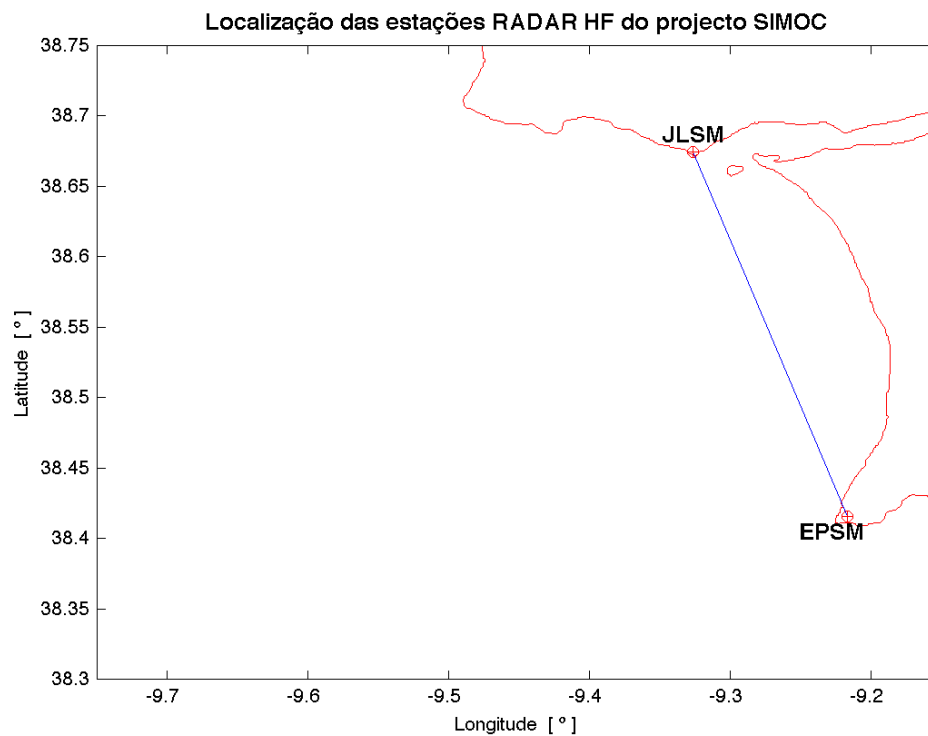


Figura 1.2: Localização das estações RADAR HF do projeto SIMOC. JLSM – Estação radar costeira de alta frequência de São Julião. EPSM – Estação radar costeira de alta frequência do cabo Espichel. A linha azul representa a linha de base do sistema RADAR HF.



Figura 1.3: Estação radar costeira de alta frequência de São Julião (JSLM). Imagem cedida pelo Instituto Hidrográfico.



Figura 1.4: Estação radar costeira de alta frequência do cabo Espichel (EPSM). Imagem cedida pelo Instituto Hidrográfico.

1.1. Medição de corrente de superfície por RADAR HF

O RADAR HF é um instrumento de medição remota da corrente e do vento à superfície, e da agitação marítima, cujas principais vantagens de utilização são a sua operação autónoma, a pouca necessidade de manutenção, e a sua capacidade de medição de correntes de superfície em qualquer estado de mar e onde o fundeamento, e manutenção, de amarrações correntométricas é muito desaconselhado e difícil (Paduan e Graber, 1997; Essen et al., 2000).

Com uma expansão notável ao longo da última década, hoje, as redes de RADAR HF são a espinha dorsal de muitos sistemas de observação do oceano, sendo os seus dados usados para validação de modelos numéricos de circulação oceânica, ou para, por métodos de assimilação, melhorar os seus resultados (Yaremchuk e Sentchev, 2011; Paduan e Washburn, 2013; Essen et al., 2000; Rubio et al., 2017).

Atualmente, não existem outros sistemas de observação capazes de mapear as correntes costeiras de superfície em escalas espaciais e temporais comparáveis às das redes de RADAR HF. Os radares HF mapeiam as correntes de superfície, em intervalos de 10 minutos a uma hora (definido pelo utilizador), e para distâncias da costa da ordem de 100 km. A extensão do mapeamento ao longo da costa é apenas limitada pelo número de sistemas de RADAR HF com sobreposição de cobertura (ver exemplo na figura 1.5).

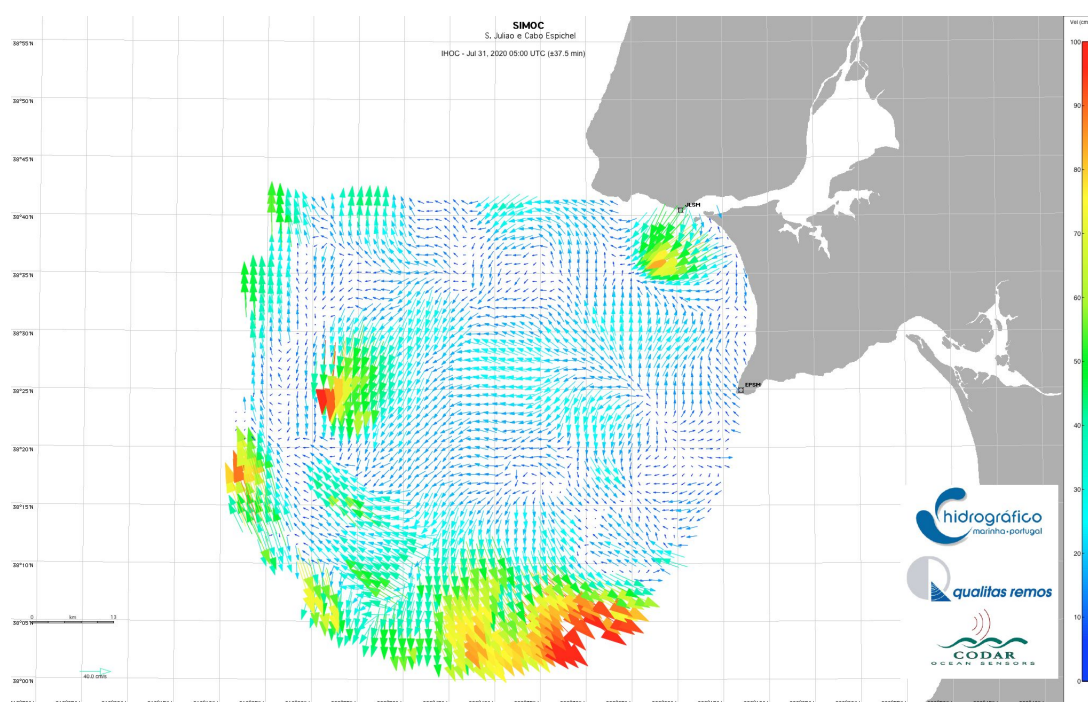


Figura 1.5: Representação da corrente de superfície medida pelo SIMOC na área coberta pelas estações RADAR HF JSLM e EPSM. Imagem cedida pelo Instituto Hidrográfico.

Os RADAR HF têm sido utilizados para calcular as correntes superficiais em muitos estudos de correntes costeiras induzidas quer pelo vento (Lana et al., 2016; Kim et al., 2009; Ullman et al., 2006; Kosro, 2005; Paduan e Rosenfeld, 1996), quer pelas descargas de rios e pelo transporte de água doce, em várias configurações costeiras, (Castelao et al., 2008; Chant et al., 2008; Kudela et al., 2010), contudo, tanto quanto se conseguiu apurar para esta investigação, não existem estudos publicados sobre correntes costeiras superficiais medidas por RADAR HF para a área geográfica compreendida entre o cabo Raso e o cabo Espichel, tampouco sobre o cálculo do contributo da corrente de maré para a corrente superficial a partir de medições de RADAR HF.

O sistema CODAR *SeaSonde* utiliza uma antena de recepção compacta com dois elementos *crossed-loop* e um elemento monopolo omnidirecional para determinar as direções de receção. Por saírem do âmbito desta investigação, remetem-se os detalhes da tecnologia *direction-finding* do RADAR HF para os trabalhos de Gurgel et al. (1999), e Teague et al. (1997). Cabe, no entanto, nesta investigação, conhecer o que mede o RADAR HF e como o faz.

Como explicam Paduan e Washburn (2013), um RADAR HF mede a componente da corrente de superfície v_r na direção radial da sua antena em vários pequenos sectores que o cercam. Estes sectores geralmente estendem-se por alguns graus em azimute e por alguns quilómetros de distância do RADAR.

A estimativa de v_r num determinado sector da superfície do mar requer um RADAR HF para medir a variação da frequência por efeito de Doppler correspondente a v_r , a par da distância do RADAR HF ao sector. A partir das medições v_r de dois ou mais radares com sobreposição de cobertura, calculam-se os vetores da corrente de superfície total.

A variação da frequência (Doppler) correspondente a v_r é obtida a partir do espectro de sinais re-transmitidos num sector da superfície do mar, geralmente medido durante vários minutos.

As características principais deste espectro são dois picos fortes e estreitos, doravante denominados picos de Bragg, gerados pela retrodifusão do sinal emitido pelas ondas gravíticas de superfície com comprimentos de onda equivalentes a metade do comprimento de onda do RADAR HF – estes picos de primeira ordem permitem o cálculo da corrente de superfície, e representam a aplicação mais generalizada e consistente da tecnologia RADAR HF. Outros picos menores e mais amplos, denominados componentes de segunda ordem do espectro, resultam das ondas de gravidade de superfície espalhadas por uma variedade de comprimentos de onda – estes picos de segunda ordem permitem o cálculo da agitação marítima, que representa, atualmente, o maior investimento na pesquisa e desenvolvimento da tecnologia RADAR HF.

Os picos de Bragg verificam-se perto das frequências $\pm f_b$, sendo

$$f_b = \left(\frac{g}{\pi \lambda} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.1)$$

Na equação 1.1, f_b é a variação de frequência (Doppler) acima ou abaixo da frequência de transmissão, g é a aceleração da gravidade e λ é o comprimento de onda do RADAR HF.

A equação 1.1 pressupõe que a retrodifusão resulta de ondas que viajam à velocidade de fase em águas profundas $\left(\frac{gL}{2\pi} \right)^{\frac{1}{2}}$, onde o comprimento de onda L é inferior ao dobro da profundidade.

Para um RADAR HF com frequência 12 MHz, $\sqrt{L} \approx 12\text{m}$, a condição de águas profundas verifica-se quando a profundidade excede $\sim 6\text{m}$. O sistema RADAR HF São Julião – Espichel opera na frequência 12,4 MHz e largura de banda 160 kHz, alcançando os 90 km de distância à antena de RADAR HF.

Logo, na maioria das áreas costeiras onde as correntes de superfície são medidas por RADAR HF, a equação 1.1 é aplicável.

Uma v_r não nula provoca uma nova variação de frequência f , pois as ondas do mar em movimento que geram $\pm f_b$ têm uma componente de velocidade adicional devida às correntes de superfície subjacentes.

Medindo f , determina-se a componente da corrente de superfície v_r a partir da equação de Doppler:

$$f = \frac{2v_r}{\lambda} \quad (1.2)$$

As larguras dos picos de Bragg, bem como o método para determinar f correspondente a um determinado sector, dependem do tipo de RADAR HF usado.

Como já referido, o sistema *SeaSonde* mede três espectros dos sinais recebidos em três elementos da antena colocados: dois elementos são *cross-loops* com respostas direcionais aos sinais recebidos, e um elemento é um monopolo omnidirecional (Barrick, 2008).

Os valores de v_r para sectores individuais em torno de um anel de sectores centrado no radar (*range ring*) correspondem à variação de frequência f nos picos de Bragg. Os azimutes dos sectores em torno do *range ring* são obtidos usando técnicas de estimativa, como a classificação de sinais múltiplos (MUSIC) (Schmidt, 1986) ou o método dos mínimos quadrados (Lipa e Barrick, 1983). A velocidade radial v_r é mapeada para vários *range rings* em torno do radar.

O alcance para o qual v_r pode ser obtida depende da potência do radar, do estado do mar e do ruído rádio de fundo, mas, em geral, é inversamente proporcional à frequência.

Segundo Gurgel (1994), as componentes zonal (u) e meridional (v) do vetor da corrente superficial podem ser calculados resolvendo-se:

$$\begin{aligned} u \cos \theta_1 + v \sin \theta_1 &= v_{r1} \\ u \cos \theta_2 + v \sin \theta_2 &= v_{r2} \end{aligned} \quad (1.3)$$

sendo, v_{r1} e v_{r2} as velocidades radiais medidas por duas estações RADAR HF, e θ_1 e θ_2 os ângulos das radiais medidos no sentido anti-horário com origem a leste.

À medida que as direcções de v_r das duas estações se tornam paralelas, os erros de medição v_r do RADAR HF são amplificados por diluição geométrica da precisão (GDOP), ou seja a contribuição puramente geométrica, entre vetores radiais, para a incerteza da medição (Chapman e Graber, 1997; Wells et al., 1986). No limite, quando as velocidades radiais v_r das duas estações são paralelas, é impossível resolver a componente da velocidade de superfície ortogonal às direcções de v_r .

Se estiverem disponíveis apenas os dados de duas estações RADAR HF, os vetores da velocidade de superfície perto da linha que liga as estações – denominada linha de base – geralmente não são mostrados face aos (grandes) erros inerentes à geometria dos vetores (Lipa, 2003).

Se estiverem disponíveis os dados de três ou mais estações RADAR HF, então u e v podem ser calculados a partir de uma solução linear de mínimos quadrados para o sistema de equações expresso na seguinte matriz:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 \\ \vdots & \vdots \\ \cos \theta_n & \sin \theta_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{r1} \\ \vdots \\ v_{rn} \end{bmatrix} \quad (1.4)$$

A resolução espacial do mapeamento de u e v depende do espaçamento da grelha escolhido dg , e de qualquer média adicional para aumentar n na equação 1.4.

Os valores típicos de dg são 0,5 km para as frequências de transmissão mais altas (~ 45 MHz), 2 – 3 km para frequências intermédias (25 – 12 MHz) e 5 – 7 km para frequências mais baixas (~ 5 MHz).

A resolução espacial da AOI é $1,4 \times 1,4$ km, para a frequência 13 MHz das estações RADAR HF instaladas no forte de São Julião e no cabo Espichel.

As velocidades radiais são calculadas pelo algoritmo da CODAR, sendo, segundo Paduan e Rosenfeld (1996), as velocidades radiais horárias obtidas pela média móvel de 75 minutos das velocidades radiais processadas a partir de um espectro médio de 15 minutos dos ecos recebidos pelo radar a cada 10 minutos.

1.2. Corrente induzida pela maré

Alguns movimentos da água nas regiões costeiras têm as mesmas frequências que as constituintes da força geradora de maré. Estes movimentos denominam-se correntes de maré.

No entanto, segundo Simon (2013), tal como no caso da altura da maré, as correntes designadas de corrente de maré podem ter duas origens distintas:

- gravitacional: movimentos derivados da força geradora da maré, que é causada principalmente pela atração newtoniana Terra – Lua – Sol; e
- radiacional: movimentos resultantes dos efeitos da radiação solar nos ciclos diários ou sazonais, por meio de todas as interações oceano-atmosfera (v.g.: campo de pressão, condições de vento, densidade das camadas da superfície do mar).

Note-se que estas correntes radiacionais, que raramente duram mais do que alguns meses, influenciam as medidas da corrente de maré por flutuações com constituintes tipicamente residuais, mas que podem assumir valores substanciais, pelo que vários processos de dinâmica oceânica devem ser considerados na sua interpretação, pois, na falta de mais informação, é difícil determinar se uma corrente residual medida se torna permanente devido a variações sazonais ou a efeitos meteorológicos e/ou oceanográficos temporários. Seja qual for a origem destas correntes residuais, quando se mostram permanentes, deixam de ter as mesmas frequências que as constituintes da força geradora de maré, pelo que não se devem classificar como correntes de maré.

De especial interesse para esta investigação é o efeito do vento sobre as correntes de superfície, uma vez que o vento tem, sobretudo, um efeito local considerável. A ação do vento induz ruído considerável que, observando a curta duração das medições da corrente de superfície geralmente disponíveis, dificulta bastante a análise das constituintes da maré nas zonas costeiras.

Outro fenómeno de especial interesse para esta investigação é a corrente inercial, cujo período é função da latitude, e que resulta do efeito da rotação da Terra sobre a corrente quando cessam os elementos forçadores que lhe deram origem, por exemplo, o vento.

$$T_{inercial} = \frac{12}{\sin \varphi} \quad (1.5)$$

sendo a latitude do local, φ , expressa em graus, e o período inercial, $T_{inercial}$, expresso em horas siderais.

Na determinação da corrente de maré, a corrente inercial poderá gerar contaminação se o seu período for próximo de um dos períodos das constituintes harmónicas da maré. Os períodos inerciais nos limites meridionais da AOI são, respetivamente, para as latitudes 38.75°N e 38.3°N, 19.17 e 19.36 horas siderais. Note-se que estes valores de $T_{inercial}$ estão fora do envelope de frequências das principais constituintes diurnas e semidiurnas, donde não é de esperar contaminação destas constituintes com processos inerciais.

Ora, se a força geradora da maré gera um gradiente da superfície livre do oceano, então, este gradiente induzirá uma corrente, a que se chama corrente de maré astronómica. Pela segunda lei de Newton, e particularizando para a direção segundo x , o equilíbrio entre a força de inércia (aceleração da partícula) e as forças do gradiente horizontal de pressão e de Coriolis, desprezando-se o atrito, é descrito pela equação:

$$-g \frac{\partial \zeta}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} - 2\omega v \sin \varphi \quad (1.6)$$

em que ζ , ω e φ são, respetivamente, a elevação do nível de água acima da posição de equilíbrio, a velocidade angular de rotação da Terra, e a latitude do local (Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine, 1968)). A corrente de maré astronómica é a componente horizontal da velocidade da água devida à atração exercida pelo Sol e pela Lua sobre a Terra, cuja periodicidade é rigorosamente conhecida, e que se distingue da corrente residual que é a componente horizontal da velocidade da água não associada à atração exercida por estes dois astros sobre a Terra.

1.3. Análise Harmónica da corrente de maré

As correntes de maré são intrinsecamente mais difíceis de analisar do que as alturas de água, porque, enquanto quantidades vetoriais, requerem mais parâmetros para a sua adequada descrição, e ainda porque, em especial nas zonas costeiras, as medições da corrente mostram maior proporção de energia não gerada pela maré, quando comparadas com as alturas de água, o que aumenta os erros na estimação das componente de maré (Pugh e Woodworth, 2014).

A corrente é, tradicionalmente, representada pela sua celeridade, q , e direção, θ , (no sentido retrógrado a partir do norte), em coordenadas cartesianas com as suas componentes zonal, u , e meridional, v , positivas nos sentidos norte e leste, respetivamente.

$$\begin{aligned} v &= q \cos \theta \\ u &= q \sin \theta \end{aligned} \tag{1.7}$$

A convenção usada nesta investigação define a direção da corrente no sentido do seu fluxo: para onde leva a corrente; oposta à convenção do vento que define a sua direção como o sentido de onde o vento sopra.

Uma vez que as correntes de maré têm a mesma causa física que a própria maré, os métodos analíticos usados para o cálculo das alturas de maré podem ser aplicados, sem alteração, ao cálculo destas correntes (Simon, 2013).

Assim, os métodos de análise de séries temporais, como a análise harmónica, podem ser aplicados em pontos isolados de grelhas de observação para separar as constituintes da maré de outras flutuações, com frequências diferentes.

Todavia, a medição da corrente tem características específicas que devem ser consideradas aquando da sua análise e processamento.

Em particular, é, muitas vezes, mais ruidosa do que a medição da altura de água, e os períodos de medição são raramente superiores a 15 dias. Ressalvam-se os dados usados nesta investigação, que resultam de medições horárias contínuas desde 2012.

No entanto, para os produtos operacionais mais usuais, a exatidão da medição da corrente não é tão exigida como no caso da medição da altura de maré.

A análise harmónica é o processo matemático de decomposição de uma série de observações em constituintes harmónicas de periodicidade conhecida, e com o qual se determinam as constantes harmónicas para cada constituinte.

Uma constituinte harmónica é um termo do desenvolvimento harmónico da força geradora da maré e da expressão correspondente para a variação das componentes da corrente de maré (ver equação 1.8).

Cada constituinte harmónica da maré representa um preciso movimento astronómico relacionado com o movimento da Terra, Lua e/ou Sol, e cuja periodicidade pode ser diária ou até, por exemplo, um

período de 18,6 anos (correspondente à regressão dos nodos lunares: pontos onde a Lua cruza o plano da eclíptica) (Martins e Reis, 2007).

As constantes harmónicas a serem determinadas são as amplitudes e as diferenças de fase em relação às constituintes da maré de equilíbrio, sendo características de cada constituinte da maré real. Uma constituinte harmónica da corrente de maré representa-se por um número complexo (ver equação 1.8) cujas constantes se determinam pela análise harmónica de séries de observações, e que são posteriormente usadas na previsão das marés, por reconstrução do sinal calculado. Designando por Γ essa constituinte harmónica podemos escrever:

$$\Gamma = u \cos(V - G_u) + i v \cos(V - G_v) \quad (1.8)$$

sendo V o argumento astronómico da constituinte harmónica, e u , G_u , v e G_v , respetivamente, as amplitudes e as diferenças de fase das constantes zonal e meridional da constituinte harmónica da corrente de maré. A curva hodográfica do vetor representado por Γ é uma elipse.

As constantes harmónicas da corrente de maré são as dimensões características da elipse de corrente, a saber:

- semieixo maior;
- semieixo menor;
- orientação do eixo maior;
- diferença de fase, ou retardo da fase da constituinte numa dada origem temporal, usualmente a culminação superior da Lua no meridiano de Greenwich.

A análise harmónica é muito eficiente para processar séries de dados longas, e é flexível o suficiente para processar séries curtas de dados de maré, bem como séries com falhas nos dados (Simon, 2013).

A duração da série de dados determina o número de constituintes que podem ser analisadas de forma independente, sendo a análise harmónica relativamente insensível ao ruído ou à falha de dados (Schureman, 1958; Pugh e Woodworth, 2014; Thomson e Emery, 2014), o que constitui o ponto forte desta técnica em relação a outras alternativas. Note-se, no entanto, que, como mostram Rosenfeld et al. (2009) e Simon (2013), são necessárias séries de dados longas (maiores do que 1 ano) para distinguir o efeito da brisa do forçamento diurno da maré. Esta influência do vento, pela semelhança da sua frequência com a da corrente de maré, em particular a componente diurna, constitui o ponto fraco da análise harmónica quando aplicada às correntes de superfície para determinação das constantes harmónicas da corrente de maré.

1.4. Objetivos e sinopse

O objetivo desta investigação é prever de modo operacional a corrente de maré entre o cabo Raso e o cabo Espichel, a partir da análise harmónica da corrente de superfície medida pelo sistema de RADAR HF São Julião – Espichel da rede de estações costeiras do Instituto Hidrográfico. Atingir este objetivo impõe: descrever as dimensões e características físicas da corrente de maré, reconhecer as propriedades do sinal da corrente de superfície que possibilitam o seu processamento matemático, calcular e interpretar a contribuição da maré na corrente de superfície, e avaliar os desafios que se põem diante da previsão operacional das correntes costeiras.

No âmbito desta investigação, entende-se como Previsão da Corrente de Maré a capacidade de antever o movimento horizontal da água estritamente induzido pela maré astronómica, num determinado ponto ou área, para um determinado período.

Entende-se como Previsão Operacional da Corrente de Maré a capacidade de interpretar e prever, a médio e longo prazo, a corrente de maré a partir da observação sistemática, em tempo real ou quase-real, da corrente de superfície (IOC, 2012).

Entende-se por previsão a médio e longo prazo a previsão para 15 e 30 dias, respetivamente.

As constituintes harmónicas consideradas na previsão operacional são as principais constituintes lunares, semi-diurnas e diurnas, a saber: M2, S2, K1 e O1, ponderados os resultados das análises das suas estatísticas angulares (ver a secção 2.6 do capítulo 2).

Nesta investigação, calcularam-se as constantes harmónicas da corrente de maré recorrendo-se às funções para MatLab do pacote UTide (Codiga, 2011) (ver capítulo 2).

As figuras 1.6 e 1.7 esquematizam uma proposta de sistema de previsão operacional de correntes de maré a partir da corrente de superfície medida pelo sistema RADAR HF São Julião – Espichel. O sistema de previsão proposto divide-se em dois passos: um primeiro de previsão da corrente de maré na área de interesse (AOI) dentro da área de cobertura do sistema RADAR HF (ver figura 1.6); e um segundo de previsão da corrente de maré para um ponto de interesse (POI) dentro da AOI (ver figura 1.7).

Os dois passos do sistema de previsão proposto distinguem-se no método dos mínimos quadrados aplicado na análise harmónica usada para o cálculo das constituintes harmónicas da corrente de maré a considerar na reconstrução do sinal da corrente cujo resultado é a previsão da corrente de maré. No primeiro passo aplica-se o método dos mínimos quadrados ordinários, no segundo passo o método dos mínimos quadrados ponderados (ver a secção 2.6 do capítulo 2).

Nos capítulos seguintes, apresentam-se os dados analisados nesta investigação, com especial foco na corrente de superfície medida por RADAR HF, e a metodologia usada no processamento destes dados (capítulo 2), expõem-se e discutem-se os resultados deste processamento, nomeadamente a comparação entre os métodos usados na análise harmónica da corrente de superfície e seleção de constituintes harmónicas a considerar na reconstrução do sinal da corrente de maré para a sua previsão operacional (capítulo 3), e por fim apresentam-se as conclusões da investigação, a par das limitações encontradas e os desafios que subsistem (capítulo 4).

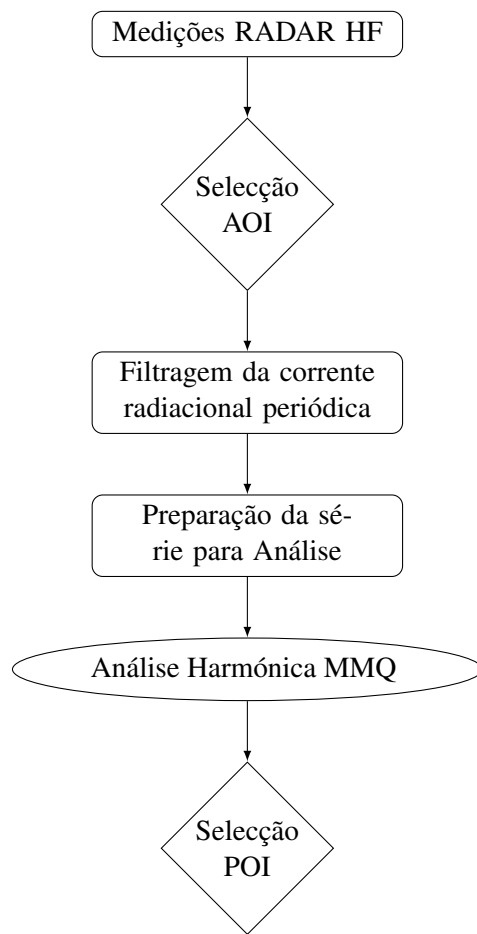


Figura 1.6: Passo 1 da proposta de um sistema de previsão operacional de corrente de maré. AOI – área de interesse. POI – ponto de interesse. MMQ – método dos mínimos quadrados ordinários.

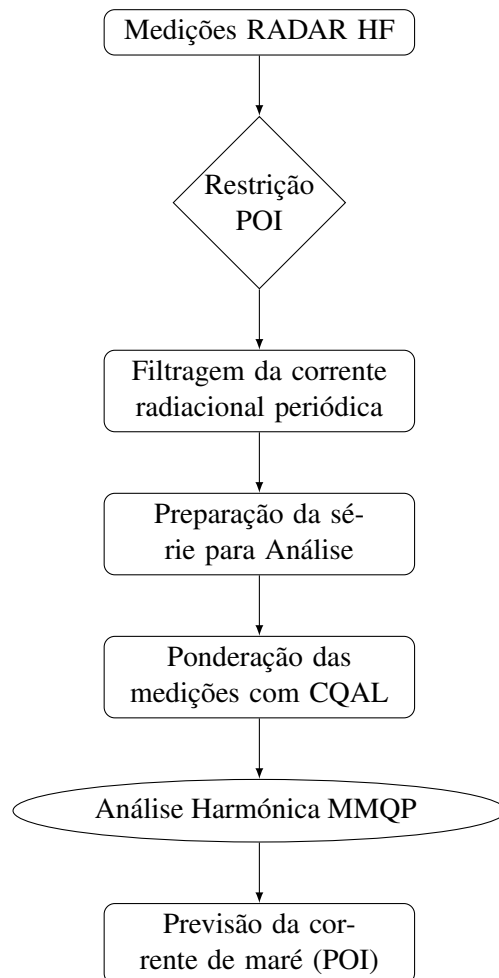


Figura 1.7: Passo 2 da proposta de um sistema de previsão operacional de corrente de maré. CQAL – *Covariance quality factor* ($\Delta U \Delta V$) dos dados RADAR HF. MMQP – método dos mínimos quadrados ponderados.

Capítulo 2

Dados e Metodologia

Com o propósito de descrever as dimensões e características físicas da corrente de maré, reconhecer as propriedades do sinal da corrente de superfície que possibilitam o seu processamento matemático, e calcular e interpretar a contribuição da maré na corrente de superfície, foram processadas e analisadas as medições da velocidade da corrente superficial medida por RADAR HF, na área geográfica limitada pelos meridianos e paralelos, respetivamente: 009.75°W e 009.15°W, e 38.3°N e 38.75°N, no tempo decorrido entre 01 de janeiro e 31 de dezembro de 2015. Foram ainda analisados períodos sazonais multianuais, entre 2013 e 2017, de especial interesse de forçamento astronómico, bem como períodos de duração variável entre 24 e 720 horas, em 2015, de especial interesse de forçamento meteorológico da corrente de superfície, bem como períodos de especial interesse quanto ao forçamento astronómico da corrente de maré, para tal processaram-se dados de vento da ERA-Interim e astronómicos do Observatório Astronómico de Lisboa (ver secções 2.2 e 2.4).

Foram analisados os ficheiros dos mapas de vetores de corrente totais calculados a partir da combinação das medições da corrente pelas Estações RADAR HF de São Julião (JLSM) e do Cabo Espichel (EPSM), instaladas, respetivamente, nas coordenadas WGS84: 38.67°N - 009.33°W, e 38.42°N - 009.22°W.

Os dados de corrente de superfície analisados são disponibilizados pelo Instituto Hidrográfico, na página do Sistema de Monitorização Operacional de Correntes Costeiras (<http://www.hidrografico.pt/radar.map>).

2.1. Dados de corrente de superfície (RADAR HF)

Os dados de corrente de superfície processados foram os vetores totais da corrente de superfície medida por duas unidades *SeaSonde* do sistema CODAR instaladas no Forte de São Julião e no Farol do Espichel, com magnitude, representativa da velocidade da corrente, expressa em centímetro por segundo, e direção em grau a partir do Norte verdadeiro, ou geográfico, (CODAR, 2013), em 996 pontos na AOI, com resolução espacial 1,4 km × 1,4 km, e resolução temporal 1 hora, de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2015. A AOI (a encarnado na figura 2.1) representa 35% da cobertura total do sistema RADAR HF São Julião Espichel, e abrange o quadrante nordeste desta área.

A figura 2.2 mostra os pontos da grelha RADAR HF sobre a linha de base, logo sem incerteza calculada (Lipa, 2003).

A figura 2.3 mostra os cem pontos da grelha RADAR HF com menor mediana de $\Delta U \Delta V$, logo com menor incerteza nas medições da corrente de superfície total.

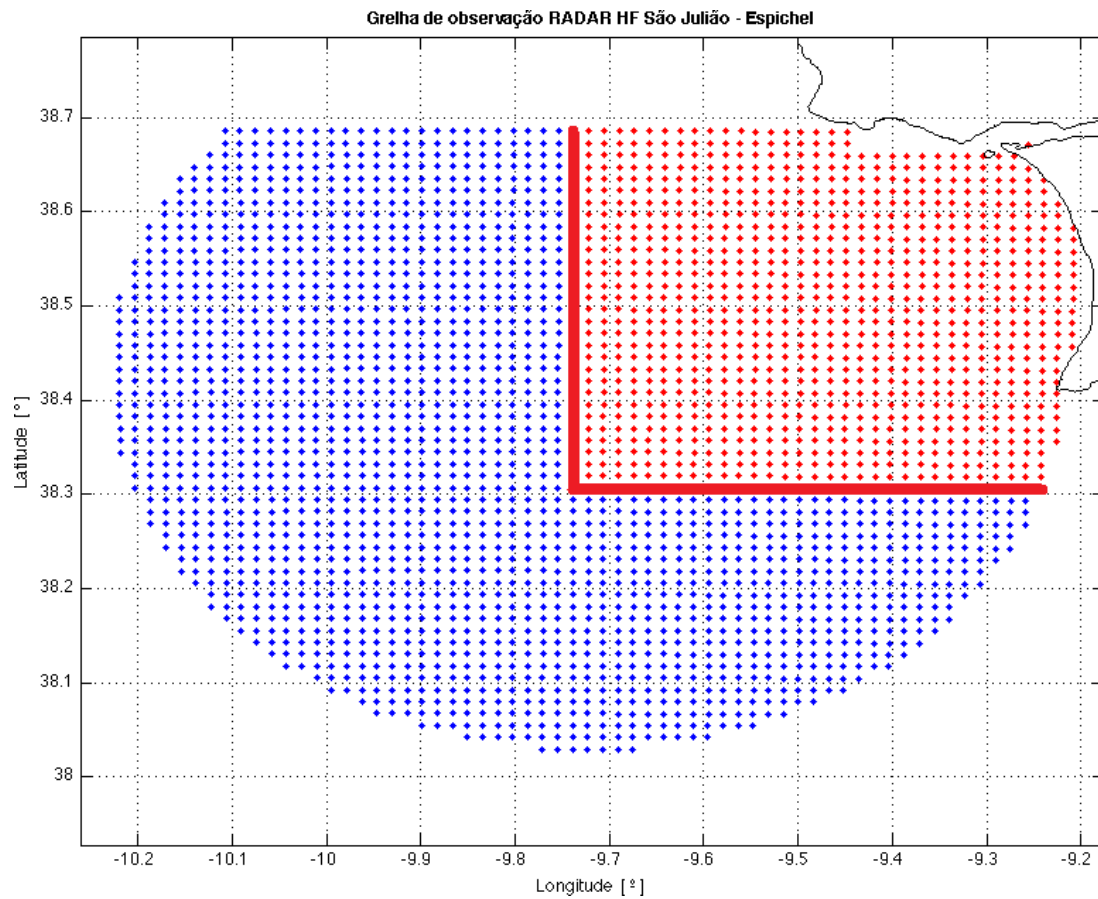


Figura 2.1: Grelha de dados RADAR HF São Julião - Espichel. A encarnado os pontos da AOI.

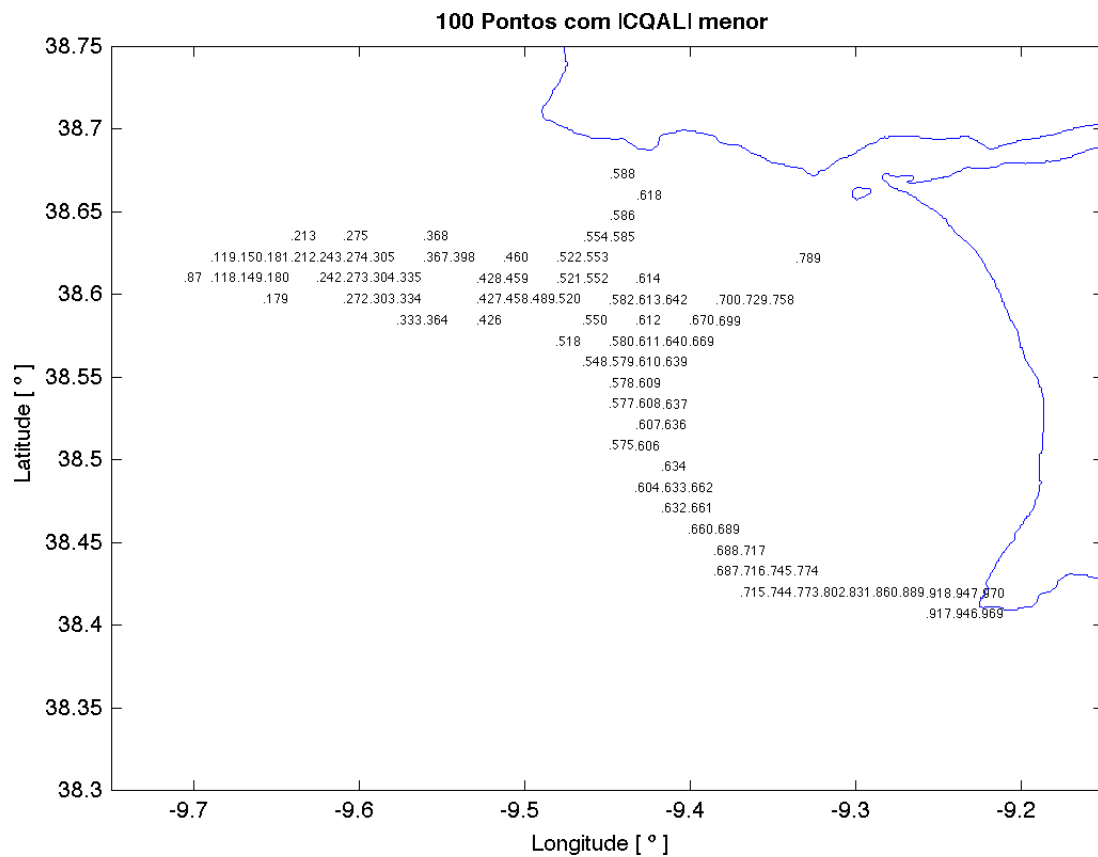


Figura 2.3: Grelha de dados RADAR HF com menor mediana $|\Delta U \Delta V|$.

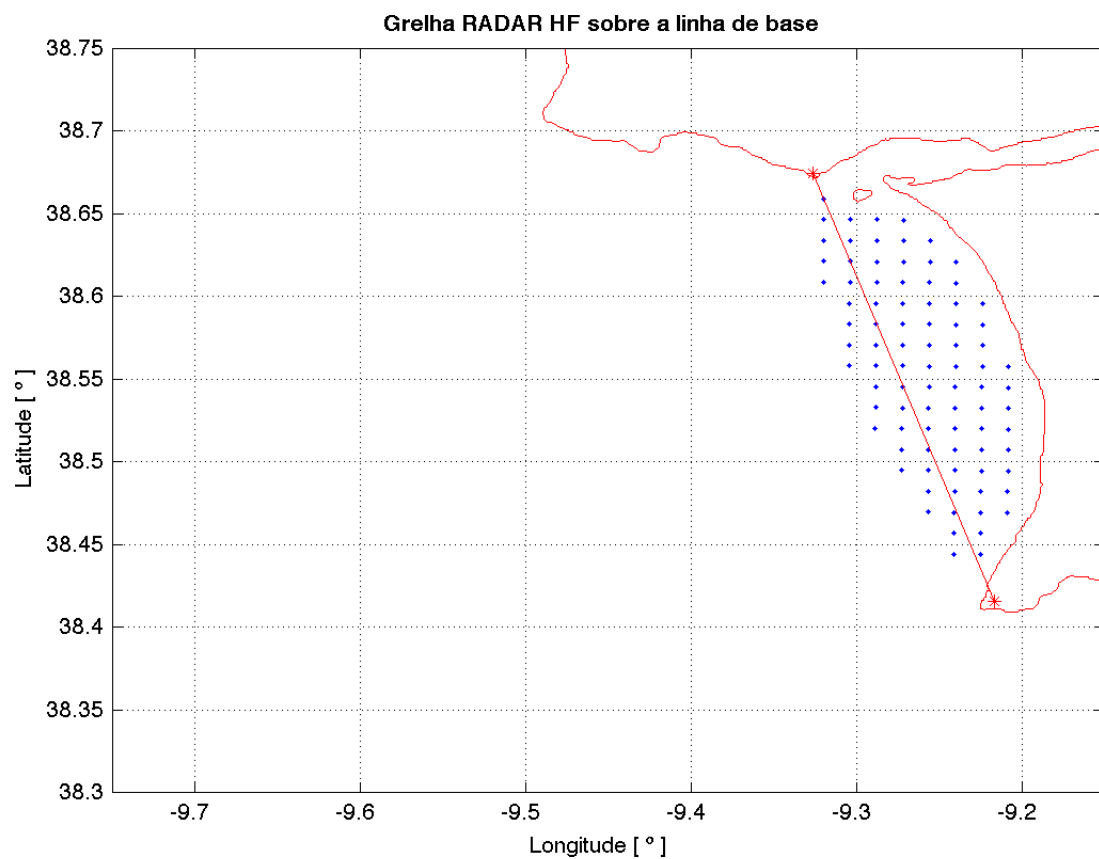


Figura 2.2: Grelha de dados RADAR HF sobre a linha de base.

A figura 2.4 mostra os cem pontos da grelha RADAR HF com maior mediana de $\Delta U \Delta V$, logo com maior incerteza nas medições da corrente de superfície total.

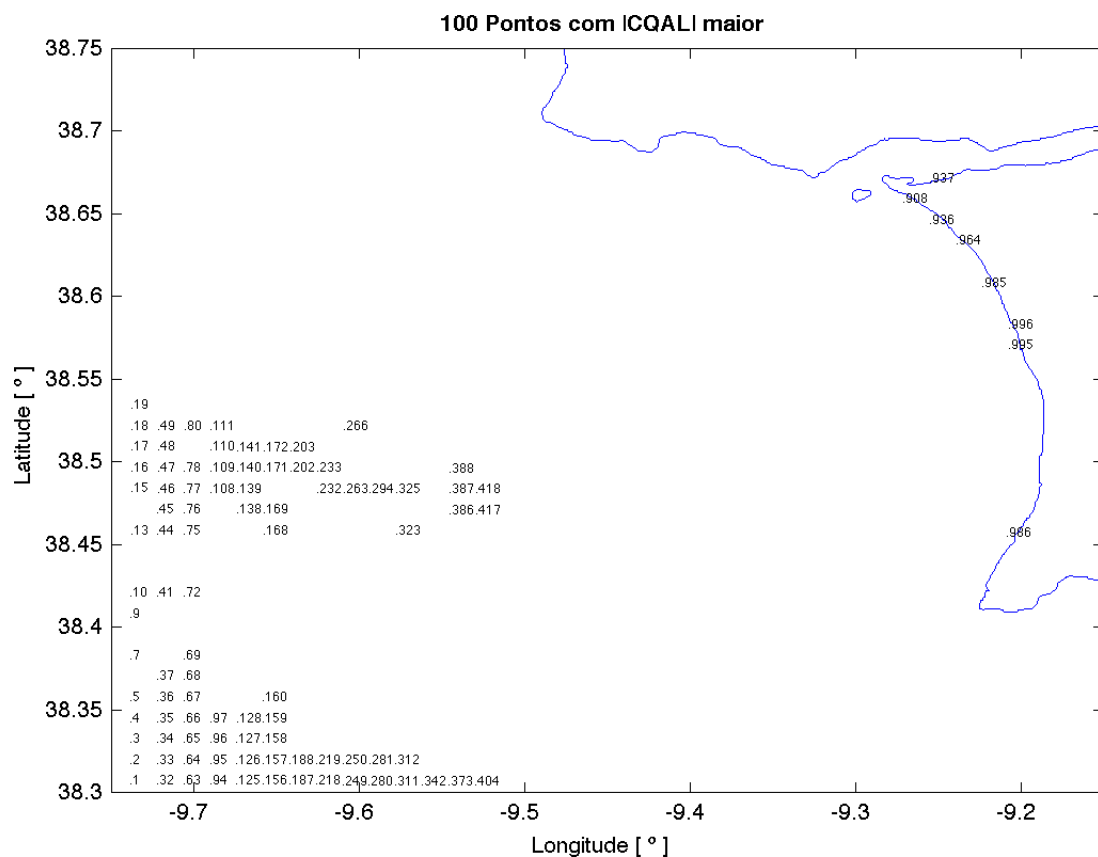


Figura 2.4: Grelha de dados RADAR HF com maior mediana $|\Delta U/\Delta V|$.

Dentre os pontos da AOI foram selecionados sete pontos com qualidade representativa das três áreas distintas da AOI (ver figura 2.5), a saber: os pontos 588, 758 e 789 na zona de águas pouco profundas e foz do rio Tejo; os pontos 426 e 575 na zona de transição entre águas pouco profundas e águas profundas; e os pontos 87 e 802 na zona de águas profundas ao largo do cabo Raso e no canhão de Lisboa - Setúbal, respetivamente. Os pontos da AOI são numerados, de 1 a 996, de sudoeste para nordeste, por ordem crescente ao longo dos meridianos. Note-se bem que o ponto 575 é contíguo à cabeça do canhão de Cascais, e próximo da linha de *shear* máximo associada ao *expansion fan*.

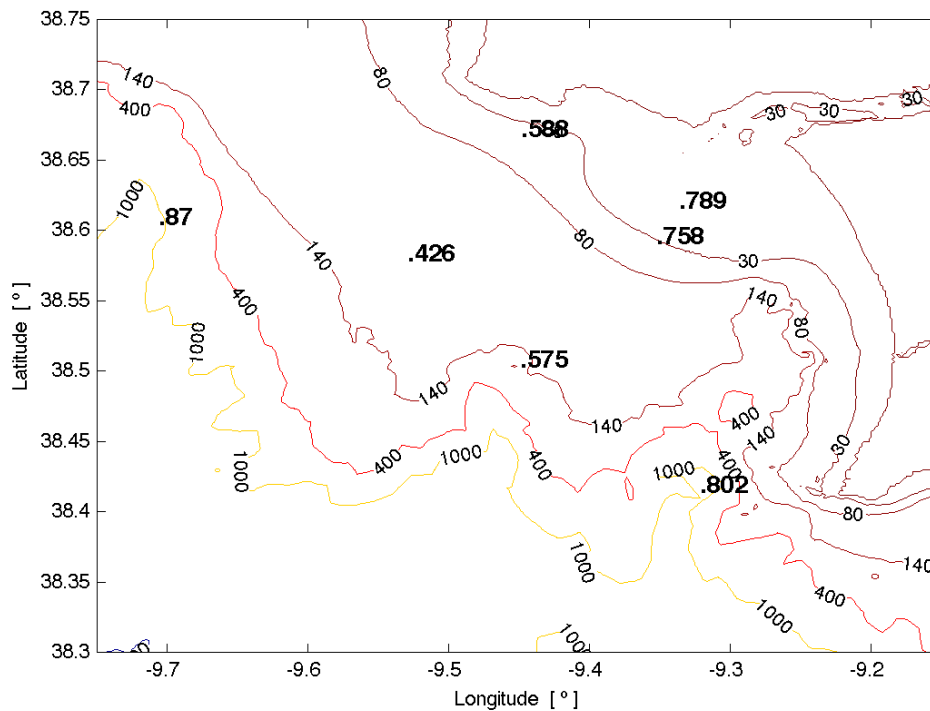


Figura 2.5: Pontos de interesse sobre a batimetria da AOI.

2.2. Dados de vento

Com o objetivo de caracterizar o vento a 10 metros (W10) na AOI, foram processados dados da reanálise ERA-Interim do ECMWF, para as componentes zonal e meridional do vento a 10 metros, expresso em metros por segundo, na área limitada a noroeste pelo ponto com coordenadas do sistema geodésico WGS84 38.75°N 009.75°W, e a sudeste pelo ponto 38.3°N 009.15°W, com resolução espacial $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ (ver figura 2.6), e resolução temporal 3 horas, de 01 de janeiro de 2013 a 31 de março de 2017.

ERA-Interim é uma reanálise atmosférica global, com dados desde 1979, atualizada continuamente em tempo real. O sistema de assimilação de dados usado para produzir a reanálise assenta numa atualização de 2006 do Sistema Integrado de Previsão (IFS Cy31r2). O sistema inclui a análise variacional 4-dimensional (4D-Var) com uma janela de análise de 12 horas (ECMWF, 2018).

Os dados de vento não foram filtrados por se tratarem de dados de reanálise atmosférica global, com atualização em tempo real.

Os dados de vento foram processados com o objetivo de selecionar os períodos de vento com velocidade média inferior a 3,3 m/s e 5 m/s e duração superior a 24 horas.

A velocidade 3,3 m/s é insuficiente para induzir corrente de superfície e corresponde a vento fraco (força 2 na escala de Beaufort) que se traduz em pequenas vagas curtas mas marcadas, cristas translúcidas, mas que não rebentam.

A velocidade 5 m/s corresponde ao limite inferior de aplicabilidade do modelo de corrente de superfície induzida pelo vento (Ekman) e pela vaga, formulado por Weber (1983).

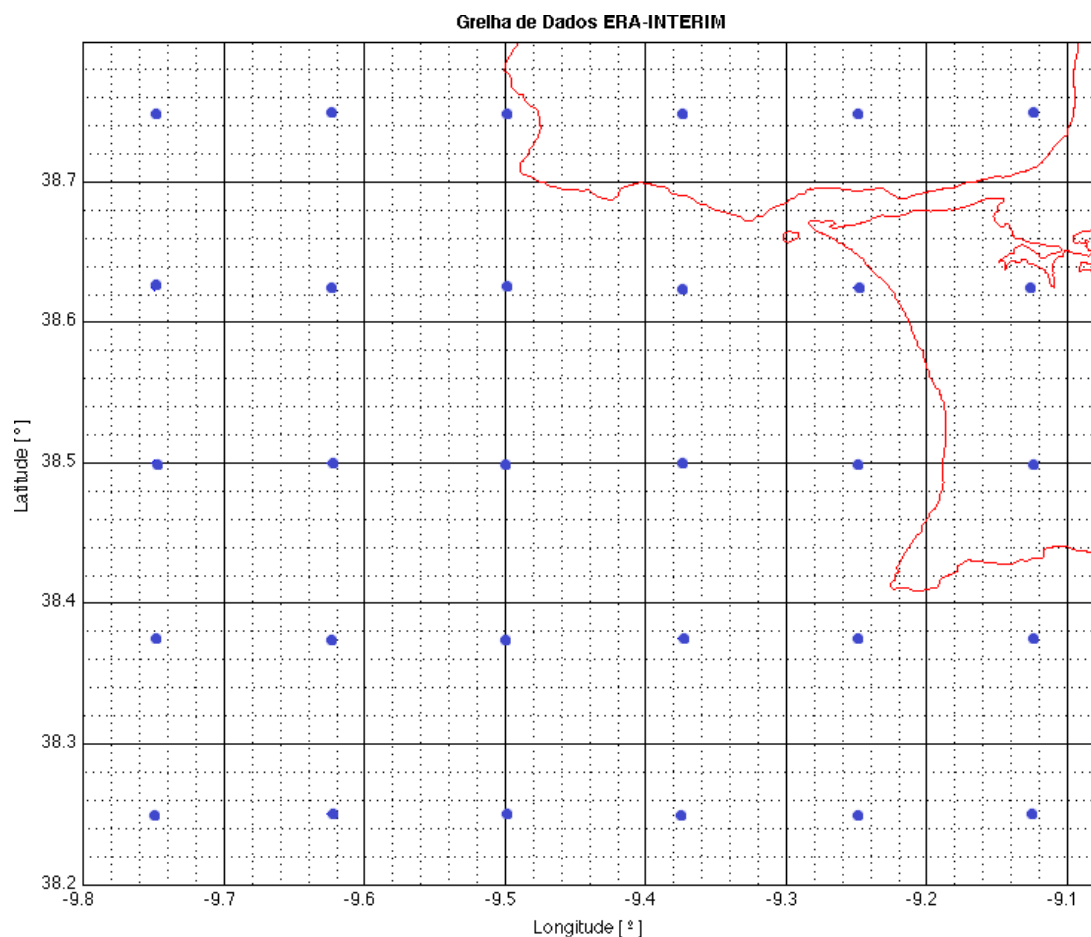


Figura 2.6: Grelha de dados ERA-Interim.

A velocidade média do vento calculou-se com o método da média móvel centrada com largura de 24 horas (M2 (13h) e K1 (24h)), 15 dias (MSF, S2 e O1) e 30 dias (N2 e Q1).

Note-se que 13 e 24 horas são a duração mínima necessária do registo de observações para resolver, respetivamente, a constituinte lunar principal semidiurna (M2) e diurna (K1).

Para a posição de referência 38,75°N 009,75°W (ponto no extremo noroeste da grelha apresentada na figura 2.6), identificaram-se, de 01 de janeiro a 31 de dezembro de 2015:

- 10 períodos de 30 dias, com média de vento inferior a 5 m/s;
- 22 períodos de 15 dias, com média de vento inferior a 5 m/s;
- 47 períodos de 24 horas com média de vento inferior a 3,3 m/s.

Os dados de vento foram analisados em frequência por dois métodos:

1. Estimação da densidade espectral de potência (periodograma de Welch)

O propósito deste método é identificar as frequências predominantes no espectro do vento.

Este método permite comparar os espectros de frequência da corrente de superfície, do vento e da corrente de maré, todavia não permite identificar, no tempo, episódios extremos.

2. Análise com onduletas (transformada contínua)

O propósito deste método é identificar os períodos em que as frequências predominantes do vento estão menos sujeitas a interferência com as frequências das constituintes harmônicas a analisar na corrente de superfície, nomeadamente a K1 e a M2, logo permite identificar, no tempo, episódios extremos ou mais interessantes para a investigação.

A análise com onduletas é um refinamento da análise de Fourier. Em particular, permite ter em consideração quer o domínio do tempo quer o domínio da frequência de forma unificada, ou seja, é possível avaliar simultaneamente a relação entre variáveis em diferentes frequências e se essa relação tem evoluído ao longo do tempo (Rua, 2012; Bordeianu et al., 2009).

2.3. Dados de batimetria

A batimetria usada foi disponibilizada pelo Instituto Hidrográfico, e tem resolução espacial de $6'' \times 6''$ ($\approx 185,2 \text{ m} \times 185,2 \text{ m}$), e abrange toda a AOI (meridianos: $009,75^\circ\text{W}$ e $009,15^\circ\text{W}$, e paralelos: $38,3^\circ\text{N}$ e $38,75^\circ\text{N}$).

A batimetria foi analisada no seu valor absoluto, e no seu declive zonal e meridional.

O propósito do estudo da batimetria foi compreender a relação entre a profundidade, e a morfologia do fundo, e a propagação da onda de maré, e consequentemente a variabilidade horizontal da corrente de maré.

2.4. Dados astronómicos

Estudaram-se os dados disponibilizados pelo Observatório Astronómico de Lisboa relativos aos equinócios e aos seus perigeus lunares mais próximos (ver tabela 2.1), e às fases da Lua (ver tabela 2.2), em especial aos novilúnios por representarem o início convencionado do ciclo de maré, com o propósito de identificar os momentos mais adequados para a análise da corrente de maré. Quando se escolheram os períodos relativos às lunações para aplicar a análise harmónica às medições do RADAR HF, considerou-se a idade de maré para a AOI de 2 dias, ou seja, 2 dias é o atraso médio da maré viva em relação à sizígia na AOI.

Tabela 2.1: Equinócios de 2013 a 2017 e Perigeus lunares mais próximos (UTC).

2013	20 de março às 20:11	31 de março às 03:56
	22 de setembro às 20:44	15 de setembro às 16:35
2014	20 de março às 16:57	27 de março às 18:31
	22 de setembro às 20:44	08 de setembro às 03:30
2015	20 de março às 22:45	19 de março às 19:39
	23 de setembro às 08:21	28 de setembro às 01:47
2016	20 de março às 04:30	10 de março às 07:03
	22 de setembro às 14:21	18 de setembro às 17:01
2017	20 de março às 10:29	30 de março às 12:40
	22 de setembro às 20:02	13 de setembro às 16:05

Tabela 2.2: Novilúnios de 2014 e 2015 (UTC).

2014	2015
01 Jan 11:14	20 Jan 13:14
30 Jan 21:38	18 Fev 23:47
01 Mar 08:00	20 Mar 09:36
30 Mar 18:45	18 Abr 18:57
29 Abr 06:14	18 Mai 04:13
28 Mai 18:40	16 Jun 14:05
27 Jun 08:08	16 Jul 01:24
26 Jul 22:42	14 Ago 14:53
25 Ago 14:13	13 Set 06:41
24 Set 06:14	13 Out 00:06
23 Out 21:57	11 Nov 17:47
22 Nov 12:32	11 Dez 10:29
22 Dez 01:36	10 Jan 01:30 (2016)

2.5. Processamento dos dados de corrente de superfície

O processamento dos dados visou analisar a componente relativa à maré nas medições da velocidade da corrente superficial medida por RADAR HF, e prever a corrente de maré a partir das constituintes harmónicas calculadas.

Com o propósito de resolver o sistema de equações definido pela análise harmónica das correntes de maré, e otimizar a sua previsão operacional, os dados de corrente de superfície foram processados com as funções MATLAB de análise e previsão unificadas da maré UTide (Codiga, 2011) com dois métodos de regressão linear distintos, a saber: método dos mínimos quadrados ordinários (MMQ) e método dos mínimos quadrados ponderados (MMQP). Aplicou-se o MMQP com o propósito de melhorar os intervalos de confiança da solução obtida por comparação com o MMQ, afinando deste modo os resultados do MMQ.

Uma vez que a exigência computacional do MMQP é muito maior do que a do MMQ, usou-se a segunda para analisar todos os pontos da área de estudo, permitindo assim compreender a variabilidade espacial da corrente de maré, e seleccionar os pontos de maior interesse pela sua maior representatividade dos processos físicos na sua vizinhança; e usou-se a primeira para analisar os pontos escolhidos com base nos seguintes critérios:

- Pontos com picos de energia cinética das constituintes harmónicas;
- Pontos com menor incerteza na velocidade total calculada, cujo cálculo considera a posição relativa das medições radiais da corrente (diluição da precisão geométrica) e a covariância das componentes zonal e meridional da corrente medida (ver equação 2.1);
- Pontos, ou áreas, de especial interesse, por exemplo, boia de espera (boia número 2 do Porto de Lisboa), cabeças dos canhões de Cascais e de Lisboa, Barra Sul do Porto de Lisboa, rotas principais de navegação.

Os dados de corrente de superfície foram processados em três momentos:

1. Processamento da série longa, anual, 365 dias, de 1 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2015. Escolheu-se o ano civil (Gregoriano) 2015 por ser o período de observações disponíveis com menos interrupções.

Neste primeiro processamento, recorrendo à análise harmónica, resolveu-se o maior número possível de constituintes harmónicas da corrente de maré, nomeadamente as de longo período como a SA (solar anual) e a Mf (lunar quinzenal), com duração mínima necessária das observações, respetivamente, 365 dias e 182 dias (Thomson e Emery, 2014).

2. Processamento de séries curtas (diárias, quinzenais e mensais), de períodos de vento fraco e insuficiente para induzir corrente de superfície, reduzindo-se, assim, o empastelamento das frequências das constituintes harmónicas pelas frequências da corrente meteorológica, ou radiacional.

As vantagens deste segundo processamento são:

- permitir o cálculo, operacional, das constituintes harmónicas da maré sempre pelo método dos mínimos quadrados ponderados: o volume de dados a processar é significativamente menor quando comparado com a série anual.
- desprezar, sem filtrar, a influência do vento na corrente de superfície, e consequentemente desprezar a corrente inercial que lhe é relativa. O período da oscilação inercial, $(2\pi/f)$, na AOI é $\approx 19,277$ horas, sendo $f = 2\Omega \sin\varphi = 0,905 \times 10^{-4} s^{-1}$, com $\Omega = 7,29 \times 10^{-5} rad/s$ e $\varphi = 38,5^\circ N$. Ao desprezar a influência do vento e da oscilação inercial, o resultado deste processamento representa apenas a corrente de maré, nas suas componentes barotrópica e baroclínica.

A desvantagem deste processamento é resolver apenas as principais constituintes harmónicas das bandas diurnas e semidiurnas, a saber: K1 (luni-solar) e M2 (lunar principal).

3. Processamento da série anual em frequência por dois métodos:

- (a) Estimação da densidade espectral de potência (periodograma de Welch)

O propósito deste primeiro método de processamento em frequência é encontrar os picos de energia por frequência no sinal da corrente de superfície medida.

Este método exige regularidade temporal dos dados a analisar, pois recorre à transformada rápida de Fourier (FFT), o que implica interpolação quando a regularidade não se verifica, logo implica maior artificialidade numérica.

Uma vez que este método não localiza no tempo os episódios anormais de energia por frequência, recorreu-se à análise de onduletas contínuas.

- (b) Análise com onduletas (transformada contínua)

O propósito deste segundo método de processamento em frequência é saber quando ocorreram os picos de energia por frequência no sinal da corrente de superfície medida, o que permite selecionar os períodos mais favoráveis para a análise harmónica da corrente.

2.6. Análise harmónica: método dos Mínimos Quadrados Ponderados

Importa saber, para melhor compreender a equação 2.6, que o vetor da corrente de superfície total medida por um sistema de RADAR HF resulta da regressão linear pelo método dos mínimos quadrados dos vetores radiais da corrente de superfície medida por pelo menos duas estações RADAR HF com sobreposição de área coberta (CODAR (2013)).

As incertezas das velocidades totais calculam-se por propagação linear do erro das velocidades radiais, o que inclui os efeitos das incertezas radiais, bem como a geometria do campo dos vetores radiais.

A medida das incertezas das velocidades totais da corrente de superfície RADAR HF representa-se pela covariância ($\Delta U \Delta V$) das suas componentes zonal e meridional, que é, segundo Lipa (2003), dada por:

$$(\Delta U \Delta V) = \frac{\sum \frac{\sin(\xi^i) \cos(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2}}{\sum \frac{\sin^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} \sum \frac{\cos^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} - \left[\sum \frac{\sin(\xi^i) \cos(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} \right]^2} \quad (2.1)$$

Sendo ξ e w as características vetoriais do sinal de *backscatter* do radar, respetivamente, a inclinação e magnitude dos vetores radiais da corrente medida (ver figura 2.7).

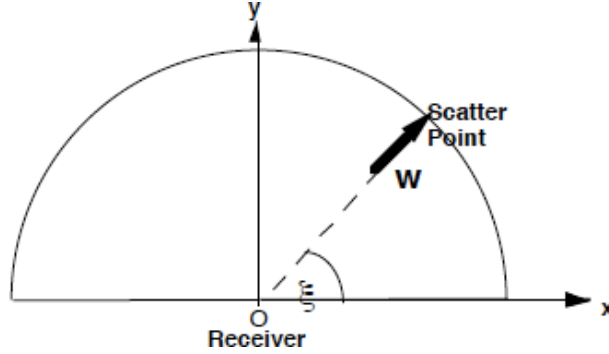


Figura 2.7: Geometria do sinal de *backscatter* do radar. A partir de Lipa (2003).

A medida das incertezas das componentes zonal e meridional das velocidades totais da corrente de superfície RADAR HF representa-se pela respetiva variância, $(\Delta U)^2$ e $(\Delta V)^2$, que são, segundo Lipa (2003), dadas por:

$$(\Delta U)^2 = \frac{\sum \frac{\sin^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2}}{\sum \frac{\sin^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} \sum \frac{\cos^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} - \left[\sum \frac{\sin(\xi^i) \cos(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} \right]^2} \quad (2.2)$$

$$(\Delta V)^2 = \frac{\sum \frac{\cos^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2}}{\sum \frac{\sin^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} \sum \frac{\cos^2(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} - \left[\sum \frac{\sin(\xi^i) \cos(\xi^i)}{(\Delta w_i)^2} \right]^2} \quad (2.3)$$

A covariância e as variâncias expressas nas equações 2.1 a 2.3 são indicadas no ficheiro de correntes totais distribuído automaticamente pelo sistema RADAR HF (CODAR, 2013).

A análise harmónica aplicada pela função UTide (Codiga, 2011) recorre à função MATLAB *robustfit* para a regressão linear robusta pelo método dos mínimos quadrados ponderados pela função de pesos de Cauchy, p .

$$p = \left[1 + r^2 \right]^{-1} \quad (2.4)$$

Sendo,

$$r = \frac{resid}{2.385 \times s \times \sqrt{1 - h}} \quad (2.5)$$

com *resid* o vetor dos resíduos da iteração anterior, h o vetor dos valores *leverage* do ajuste por mínimos quadrados, e s a estimativa do desvio padrão do termo de erro diretamente proporcional ao desvio absoluto médio dos resíduos em relação à sua mediana.

Para garantir que as medições da corrente de superfície com menor covariância, logo maior certeza, fossem privilegiadas na regressão linear pelo MMQP, adaptou-se e desenvolveu-se a formulação da função de ponderação p_{mod} com a soma da covariância normalizada pelos resíduos (r) da regressão linear. Normalizou-se a covariância com o propósito de garantir a concordância das ordens de grandeza dos resíduos e das covariâncias.

$$p_{mod} = \left[1 + r^2 + \frac{\sum_{i=1}^n r^2}{\sum_{i=1}^n (\Delta U \Delta V)^2} (\Delta U \Delta V)^2 \right]^{-1} \quad (2.6)$$

Na equação 2.6, n é o número de pontos observados.

O método dos mínimos quadrados ponderados (MMQP) é menos sensível a *outliers* do que o método dos mínimos quadrados ordinários (MMQ) (Codiga, 2011).

No MMQP, a regressão linear pondera cada dado, de modo automático e iterativo.

Na primeira iteração, a cada ponto é atribuído igual peso e os coeficientes do modelo linear são estimados usando o MMQ.

Nas iterações posteriores, os pesos são recalculados para que aos pontos mais distantes da previsão do modelo na iteração anterior se atribua um menor peso.

Os coeficientes do modelo são então recalculados usando o MMQP com a função de pesos expressa na equação 2.6, continuando o processo até que os valores das estimativas dos coeficientes converjam dentro da tolerância definida.

Com a modificação da função de pesos de Cauchy p_{mod} pretendeu-se reduzir os intervalos de confiança dos parâmetros das elipses das constituintes harmônicas da corrente de maré calculada na regressão linear por MMQP, aumentando assim a confiabilidade da sua estimativa. Esta redução dos intervalos de confiança resulta da ponderação das medições da corrente de superfície pela respetiva covariância ($\Delta U \Delta V$).

Os intervalos de confiança para as características da elipse de cada constituinte harmónica da corrente de maré calcularam-se, na função UTide, por simulação Monte Carlo, com ruído colorido (Codiga, 2011).

2.7. Estatística direcional da corrente de maré

Aplicou-se o método desenvolvido no Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa de visualização gráfica dos vetores representativos de cada constituinte para os vários troços que facilita a análise da estabilidade ou não de cada constituinte. Este método permite uma visão da importância relativa das quatro constituintes de maior amplitude, todas semidiurnas; por outro lado, a quase coincidência dos vetores mostra como as várias séries usadas poderão ser consideradas igualmente adequadas para a obtenção das constituintes harmónicas que darão origem às previsões de maré oficiais. Trata-se de uma análise bastante sugestiva, porém tem a desvantagem de não discriminar os vários períodos de dados em análise. (Martins e Reis, 2007)

Para concluir sobre a estabilidade de cada constituinte harmónica da corrente de maré, aferiu-se a dispersão angular da fase de cada constituinte harmónica, pela norma do vetor médio das suas fases ($\|\bar{G}\|$) (Berens, 2009):

$$\|\bar{G}\| = \sqrt{G_u^2 + G_v^2}, \quad (2.7)$$

sendo G_u e G_v as coordenadas retangulares do vetor médio:

$$G_u = \frac{\sum \cos(G)}{n}, \quad (2.8)$$

$$G_v = \frac{\sum \sin(G)}{n},$$

onde G é a fase da constituinte harmónica, e n é o número de medições da fase da constituinte harmónica calculadas por análise harmónica de diferentes períodos do registo da corrente para um determinado local.

A norma do vector médio é uma medida da dispersão angular, semelhante ao desvio padrão, salvo algumas considerações:

- varia entre 0 e 1;
- se nula, representa uma dispersão angular uniforme;
- se igual a 1, representa a concentração angular numa única direção.

2.8. Dados de previsão da corrente de maré

Os dados de previsão da corrente de maré, nas suas componentes zonal e meridional, resultam da reconstrução do sinal da corrente com as constituintes harmónicas calculadas com as funções MATLAB UTide (Codiga, 2011), sendo a velocidade expressa em centímetro por segundo e a direção em grau a partir do Norte verdadeiro, ou geográfico, para os 996 pontos com medições RADAR HF da AOI. A resolução espacial destes dados é $1,4 \text{ km} \times 1,4 \text{ km}$, e a resolução temporal 1 minuto, de 01 de janeiro de 2015 a 31 de dezembro de 2015 (ver figura 2.8).

As constituintes harmónicas da corrente de maré representam-se pelas características das suas elipses: comprimento dos semieixos, fase, inclinação, e respetivos erros.

Optou-se por não interpolar os valores da corrente de maré reconstruída para evitar artificialidade numérica.

Os dados de previsão de corrente de maré foram comparados com os dados de observação de corrente superficial (RADAR HF), e os resíduos (observação - modelo/previsão) foram analisados em frequência com os mesmos métodos com que se analisaram os dados RADAR HF: estimação da densidade espectral de potência (periodograma de Welch) e análise com onduletas (transformada contínua).

Os resultados das análises em frequência dos resíduos foram comparados com as análises em frequência do vento.

A energia cinética das constituintes harmónicas resultantes da análise harmónica dos dados de corrente superficial foi analisada e representada a sua variabilidade espacial na AOI, para determinação da importância relativa de cada constituinte harmónica na corrente de maré, bem como para identificação de zonas de maior predominância por tipo de corrente (de maré ou radiacional).

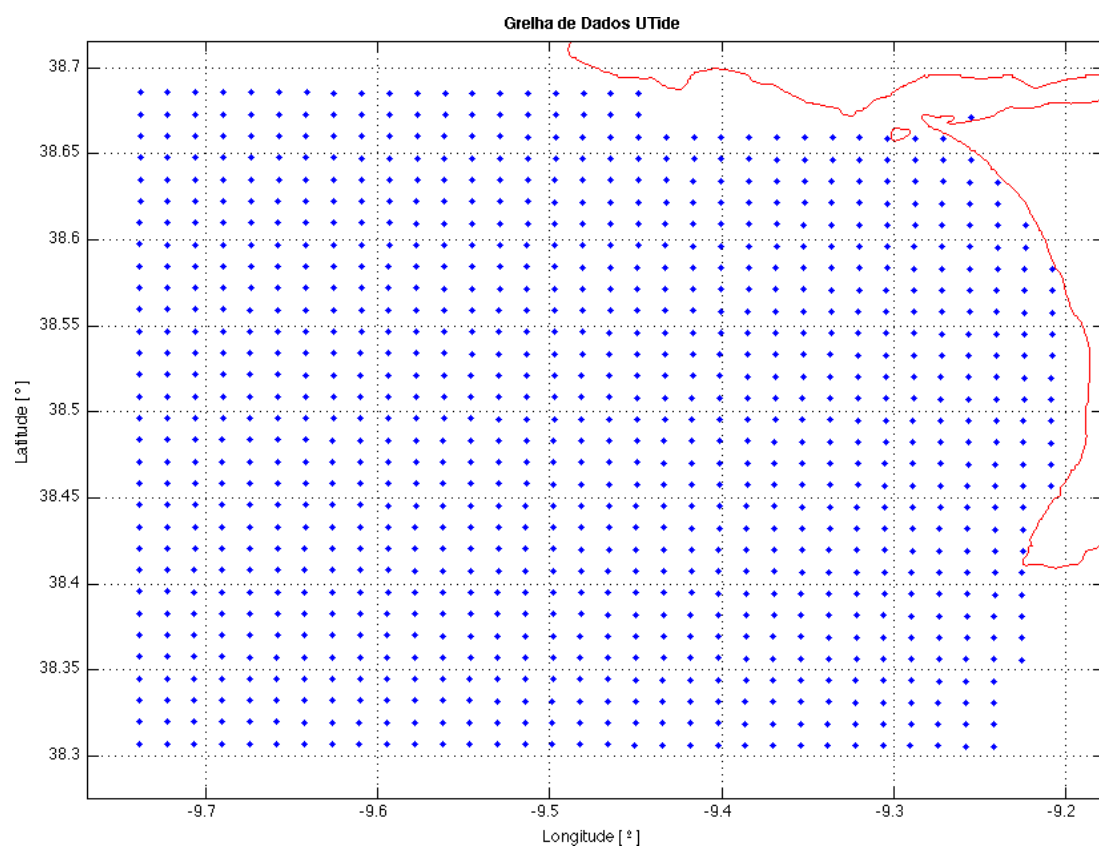


Figura 2.8: Grelha de dados de corrente de maré (UTide).

Capítulo 3

Processamento dos dados e Discussão dos resultados

Neste terceiro capítulo, apresentam-se e discutem-se os resultados do processamento dos dados de vento, corrente superficial medida por RADAR HF e batimetria, seguindo-se a discussão dos testes de comparação entre os resultados da análise harmónica a partir dos métodos dos mínimos quadrados ordinários, ponderados com a função de *Cauchy* e com a função de pesos desenvolvida pelo autor, e por fim a discussão dos resultados da análise da estatística direcional da corrente de maré e da previsão da corrente de maré a partir da reconstrução do seu sinal com as constantes harmónicas calculadas.

Esta investigação não pretende caracterizar a corrente de superfície, tampouco a corrente de maré, na AOI, mas sim prevê-la de modo operacional, todavia recorre-se à sua caracterização breve com o propósito de analisar, de modo crítico, a coerência dos resultados obtidos na análise harmónica, em jeito de validação teórica do modelo.

3.1. Do vento

A figura 3.1 mostra o espectro do vento à superfície durante o ano 2015, para a posição 38.75°N - 009.75°W. Notam-se, na componente zonal, três picos de energia, por ordem decrescente de intensidade: um primeiro nas ondas longas, um segundo na velocidade angular diurna, na vizinhança dos 15 °/hora, e um terceiro, muito mais fraco, nas ondas semidiurnas. Já na componente meridional, apenas o pico de energia nas ondas longas é expressivo.

A análise harmónica feita ao sinal do vento à superfície corrobora o pico de energia na frequência diurna do vento, mesma frequência da constituinte harmónica da maré diurna K1.

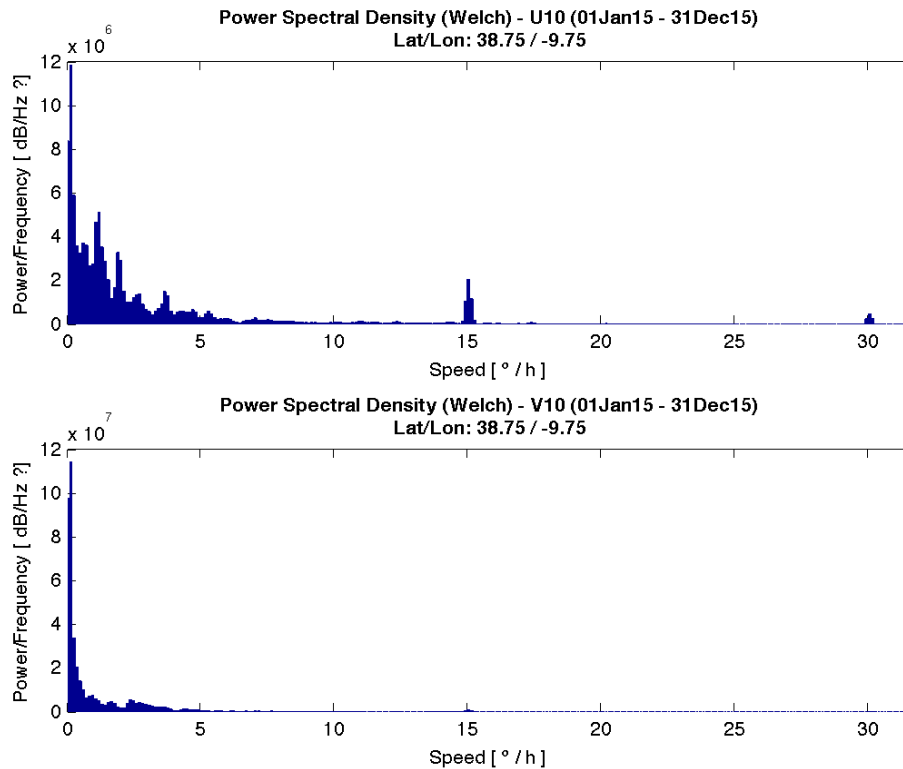


Figura 3.1: Densidade espectral de potência (Welch), por componentes meridional (v10) e zonal (u10), do vento à superfície (10 metros) na posição 38.75°N - 009.75°W durante o ano 2015.

As figuras 3.2 a 3.4 mostram a média móvel do vento a 10 metros com intervalo de 24 horas, 15 dias e 30 dias, durante o ano 2015. As linhas a encarnado marcam os limites de vento fraco: 3,3 m/s e 5 m/s. Os meses de abril, outubro e novembro foram os meses com média móvel da velocidade do vento mais baixa.

O período de 23 de outubro a 24 de outubro de 2015 teve a menor média móvel de 24 horas da velocidade do vento a 10 metros dos quarenta e sete períodos identificados com velocidade média inferior a 3,3 m/s. A velocidade média neste período foi 1,30 m/s, com desvio padrão 0,57 m/s.

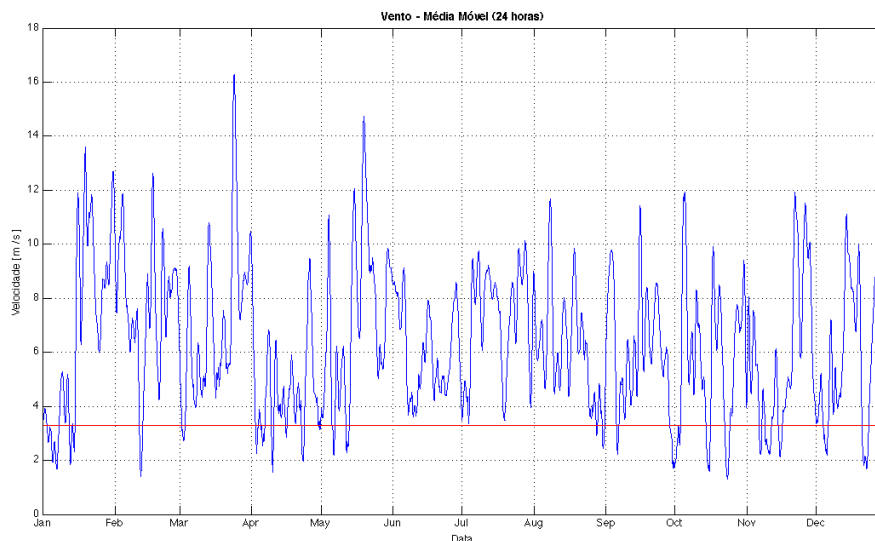


Figura 3.2: Média móvel de 24 horas do vento a 10 metros (38.75°N - 009.75°W - 2015).

O período de 05 de novembro a 20 de novembro de 2015 teve a menor média móvel de 15 dias da velocidade do vento a 10 metros dos vinte e dois períodos identificados com velocidade média inferior a 5 m/s. A velocidade média neste período foi 3,75 m/s, com desvio padrão 1,44 m/s.

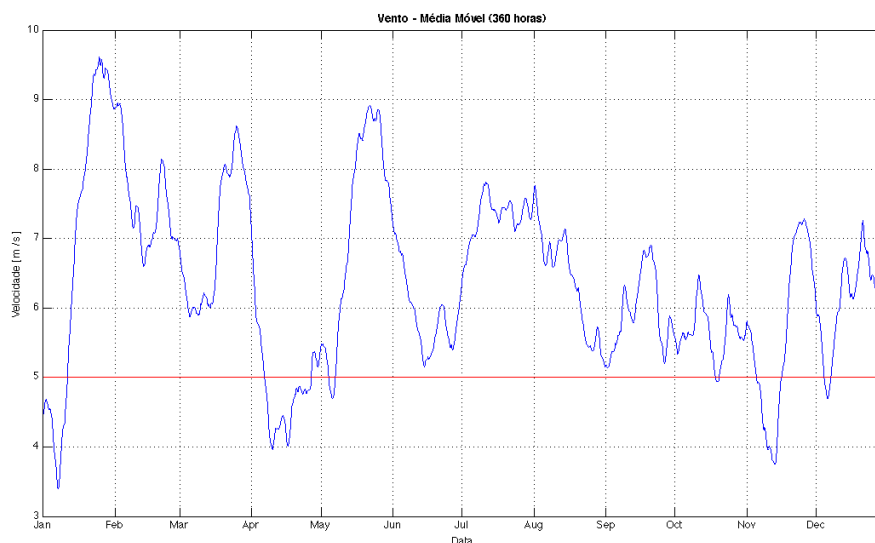


Figura 3.3: Média móvel de 15 dias do vento a 10 metros (38.75°N - 009.75°W - 2015).

O período de 02 de abril a 02 de maio de 2015 teve a menor média móvel de 30 dias da velocidade do vento a 10 metros dos dez períodos identificados com velocidade média inferior a 5 m/s. A velocidade média neste período foi 4,38 m/s, com desvio padrão 1,99 m/s.

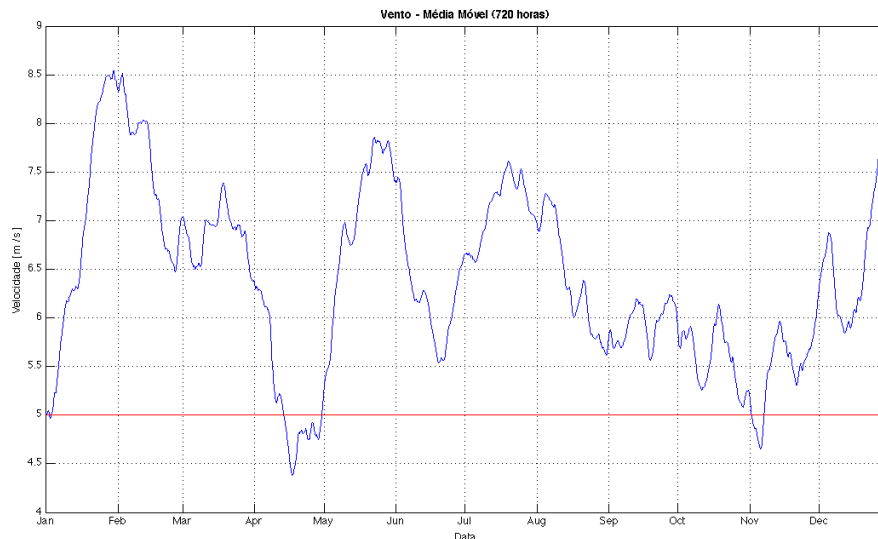


Figura 3.4: Média móvel de 30 dias do vento a 10 metros (38.75°N - 009.75°W - 2015).

3.2. Da corrente de superfície (RADAR HF)

A figura 3.5 mostra a cobertura temporal da medição da corrente de superfície pelo RADAR HF, durante o ano 2015. Com exceção de uma área com cerca de 6 milhas náuticas quadradas, junto à fronteira ocidental da AOI, toda a AOI foi medida pelo menos 90% do tempo total de observação.

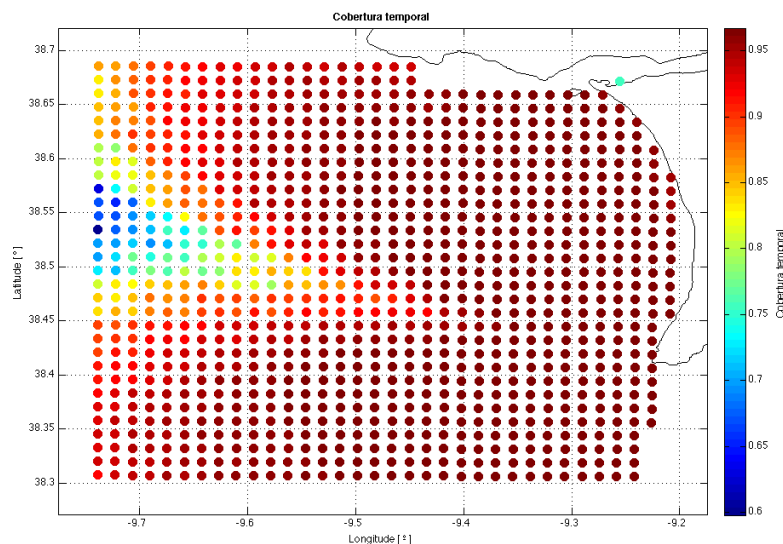


Figura 3.5: Cobertura temporal da medição da corrente de superfície pelo RADAR HF na AOI (2015).

A figura 3.6 mostra o histograma da variação temporal da cobertura espacial da medição da corrente de superfície pelo RADAR HF, durante o ano 2015. A corrente de superfície foi medida pelo menos 70% do tempo total de observação em 98,6% dos pontos da AOI.

As figuras 3.7 a 3.13 mostram a frequência da corrente de superfície (Ws), para o ano 2015, nos POI 588, 758 e 789 (zona de águas pouco profundas e foz do rio Tejo); nos POI 426 e 575 (zona de

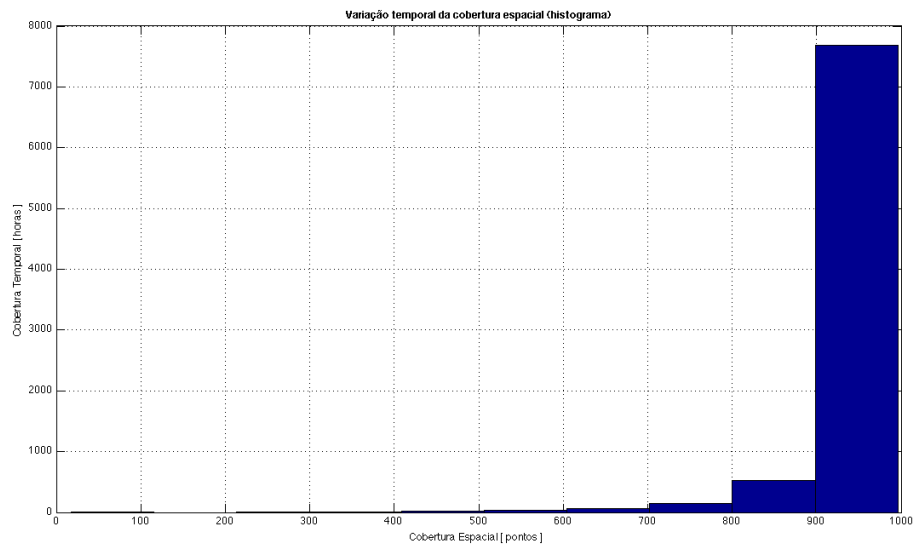


Figura 3.6: Histograma da variação temporal da cobertura espacial das medições RADAR HF (2015).

transição entre águas pouco profundas e águas profundas, sendo o POI 575 contíguo à cabeça do canhão de Cascais); e nos POI 87 e 802 (zona de águas profundas ao largo do cabo Raso e no canhão de Lisboa - Setúbal, respetivamente). Para rever a localização destes POI ver figura 2.5.

A corrente de superfície para valores até aos 20 cm/s apresenta um padrão rotativo em todos os pontos representados. Para os valores máximos da sua intensidade, a corrente de superfície apresenta um padrão alternado com predominância da descarga no sentido sudoeste (alinhado com a pluma estuarina do Tejo), em especial nos POI 758 e 789.

Quando a corrente de superfície é alternada, caso dos POI 758 e 789 (ver figuras 3.8 e 3.9), apresenta predominância de valores de velocidade extremados, entre os 40 e os 70 cm/s. Ao passo que no caso do padrão rotativo, a sua velocidade não excede com frequência relevante os 30 cm/s.

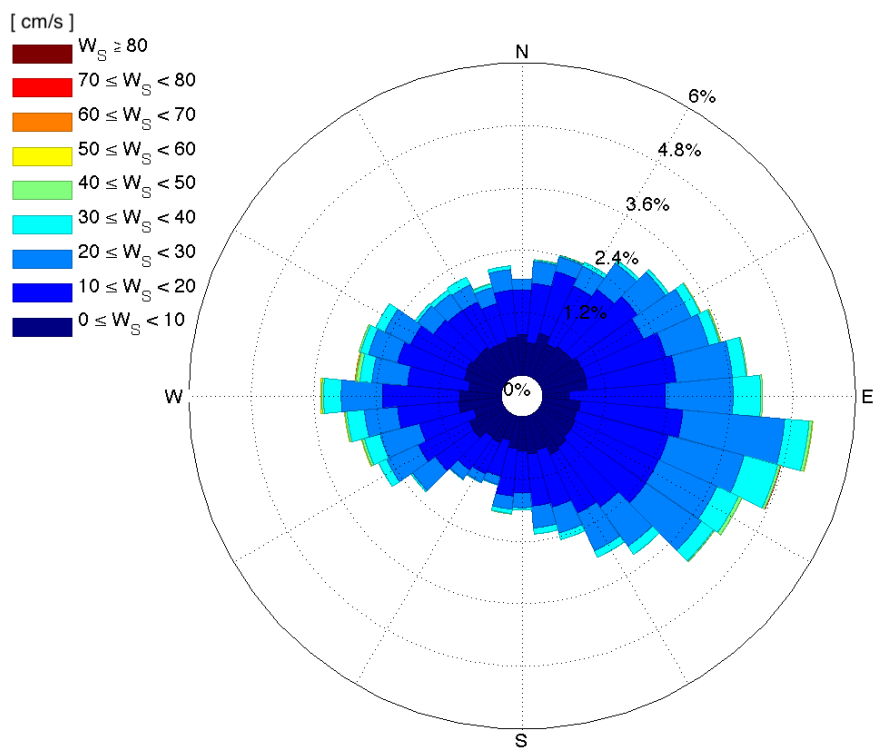


Figura 3.7: Corrente de superfície no POI 588 (2015).

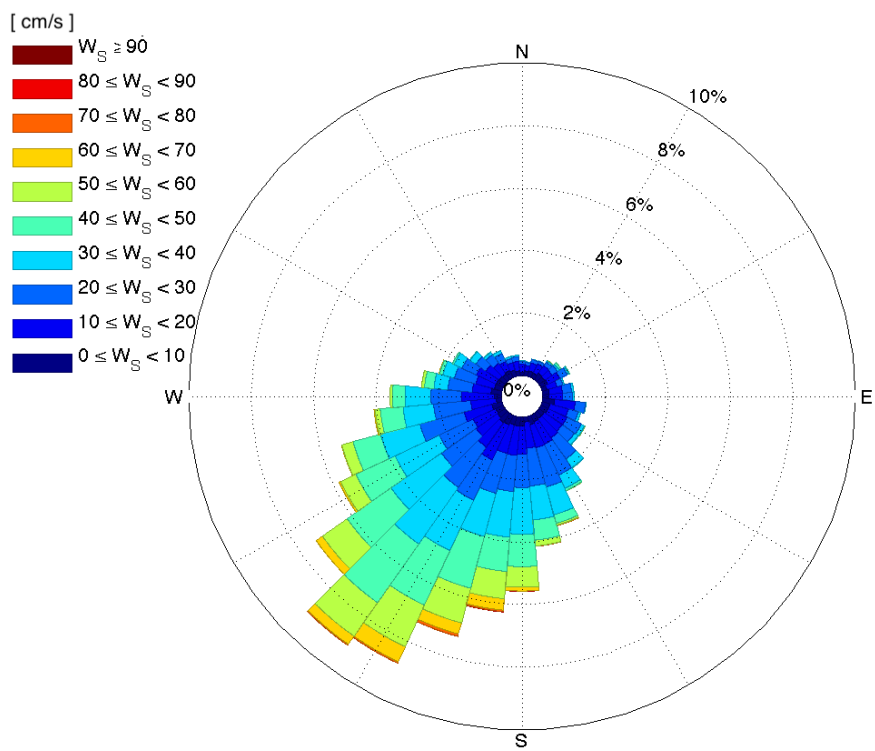


Figura 3.8: Corrente de superfície no POI 758 (2015).

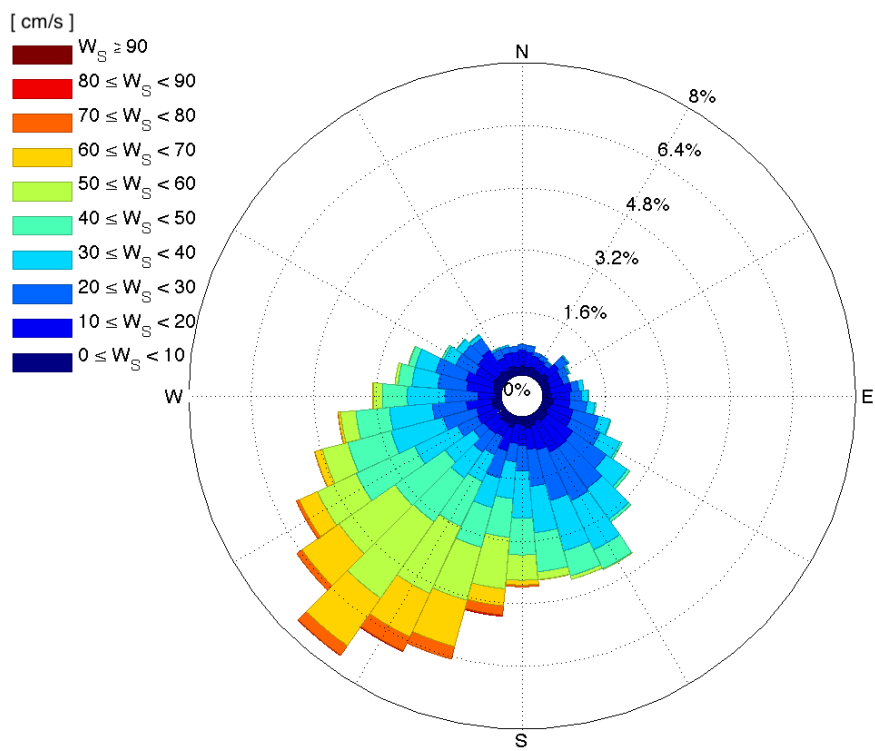


Figura 3.9: Corrente de superfície no POI 789 (2015).

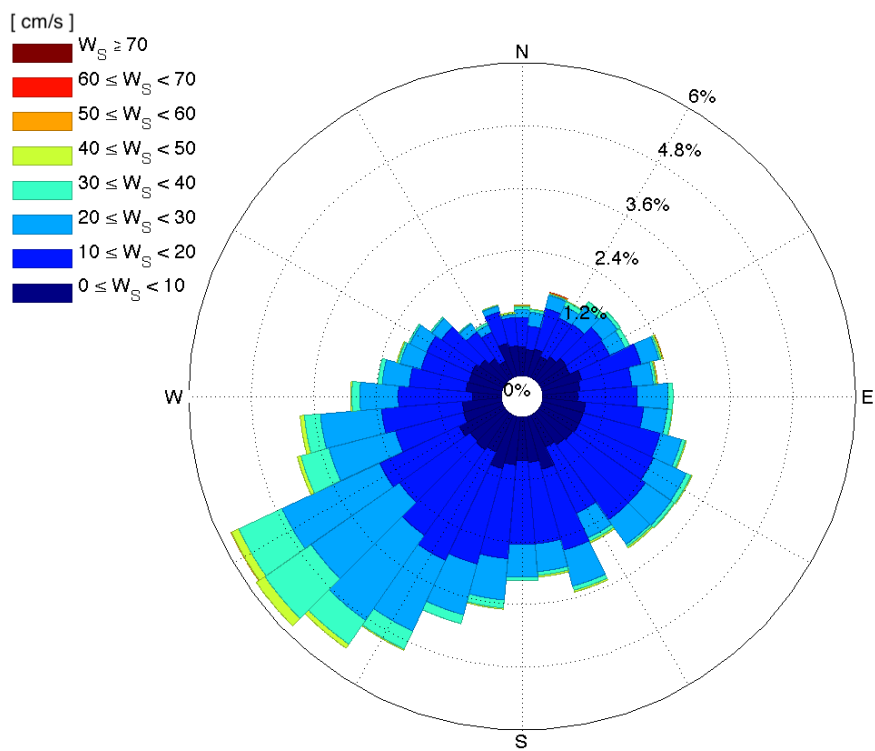


Figura 3.10: Corrente de superfície no POI 426 (2015).

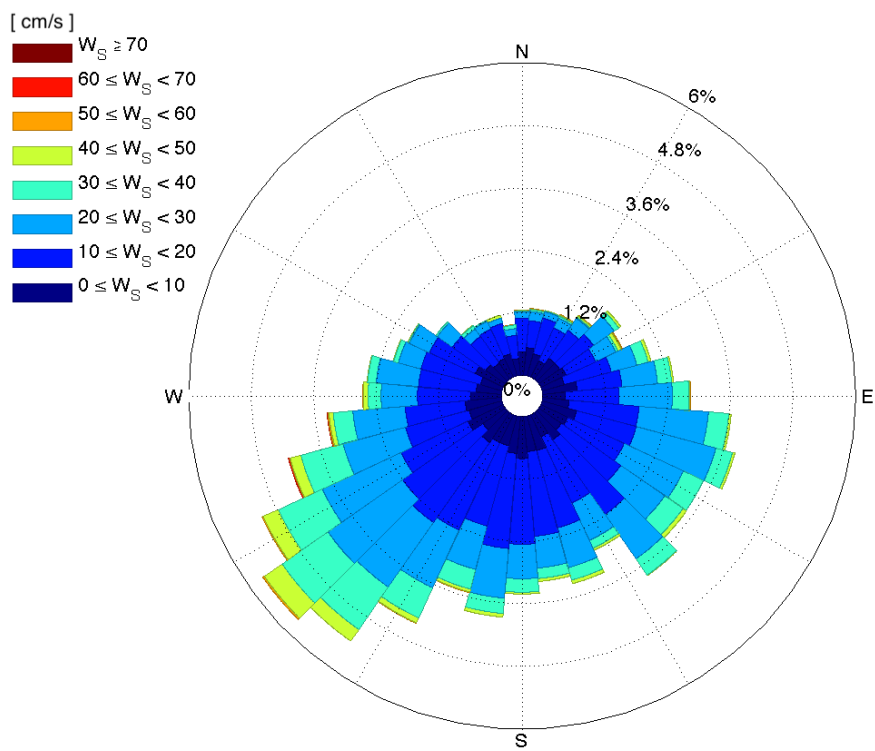


Figura 3.11: Corrente de superfície no POI 575 (2015).

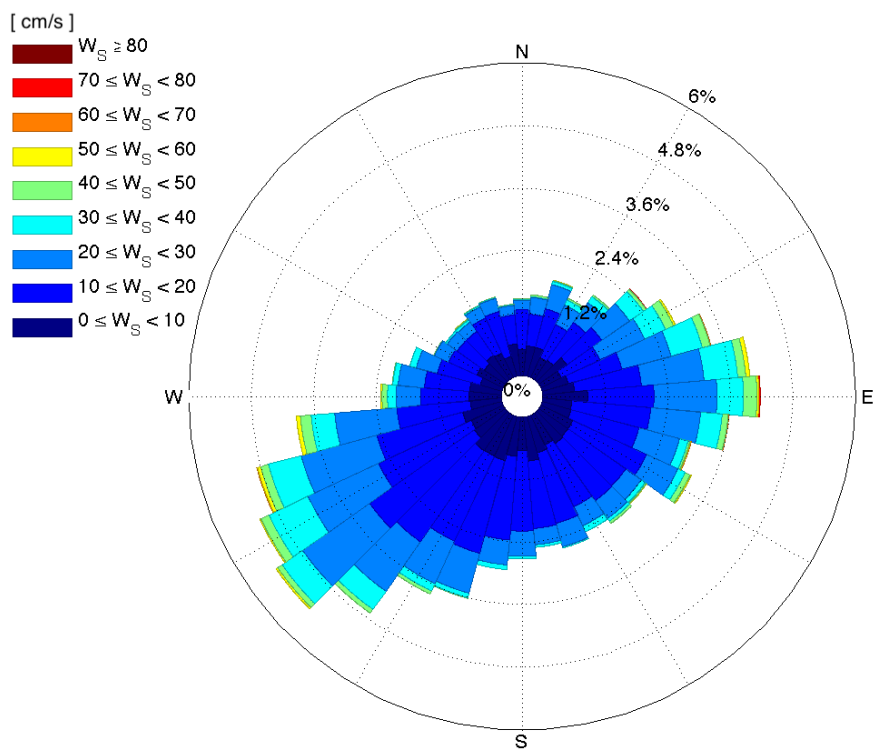


Figura 3.12: Corrente de superfície no POI 87 (2015).

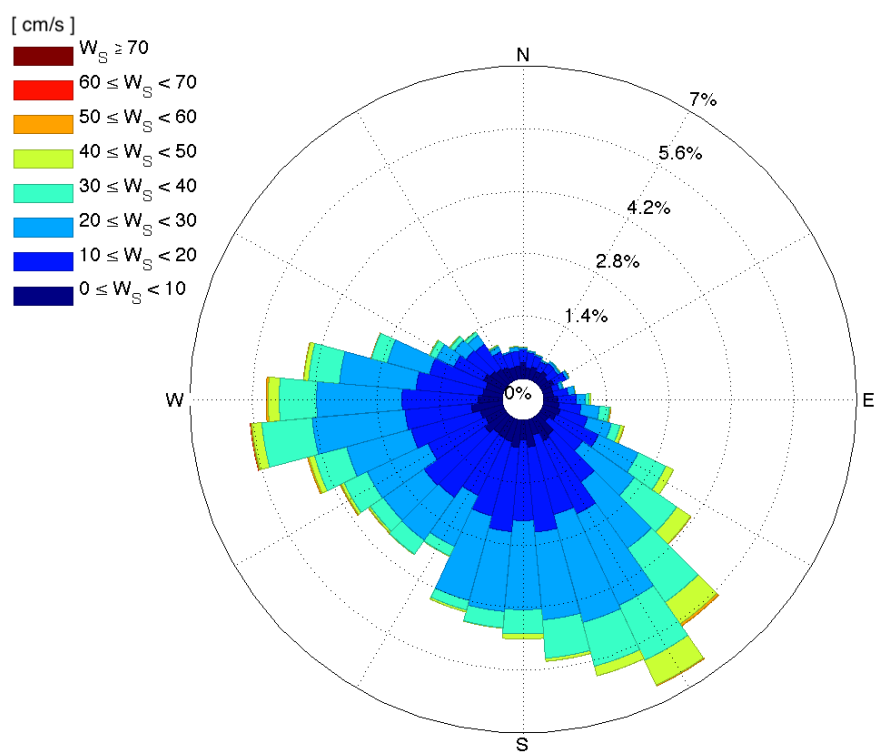


Figura 3.13: Corrente de superfície no POI 802 (2015).

3.3. Da batimetria

A batimetria da AOI é marcada pelo Baixo da Cabeça do Pato (fig. 3.14 a), na foz do rio Tejo, e pelas cabeças dos canhões submarinos de Cascais (fig. 3.14 b) e de Setúbal-Lisboa (fig. 3.14 c), respectivamente, na vizinhança dos pontos $38^{\circ}30'35''\text{N} - 009^{\circ}27'33''\text{W}$, e $38^{\circ}33'15''\text{N} - 009^{\circ}16'48''\text{W}$.

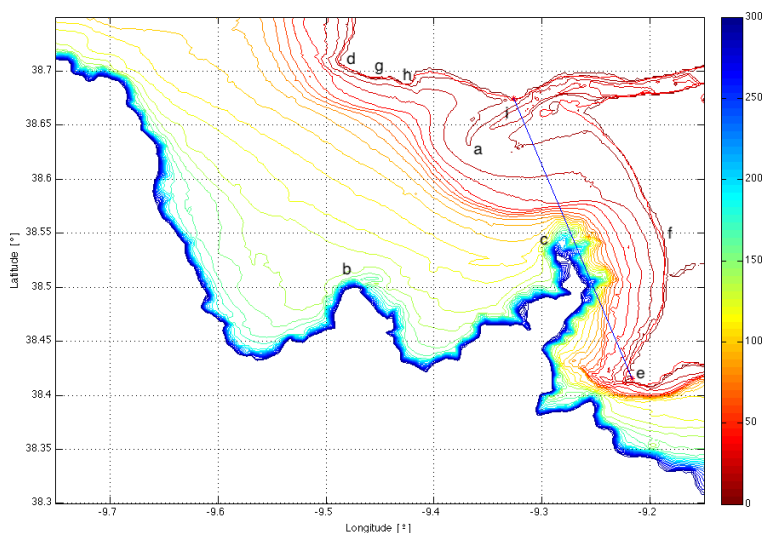


Figura 3.14: Batimetria da AOI. Ver legenda da figura no corpo desta secção.

A linha de base do sistema RADAR HF São Julião Espichel, cruza a foz do rio Tejo e a cabeça do canhão de Lisboa.

A AOI pode dividir-se em três áreas de batimetria distintas:

- Uma área de profundidades inferiores a 75 m, que acompanha a linha de costa do cabo Raso (fig. 3.14 d) ao cabo Espichel (fig. 3.14 e);
- Uma área de profundidades entre os 75 m e os 150 m, que faz a transição entre a linha de costa e os canhões submarinos, e cujas batimétricas se orientam predominantemente no eixo azimutal $330^{\circ} - 150^{\circ}$. Esta área é quase inexistente entre a cabeça do canhão de Setúbal-Lisboa e a linha de costa entre a Fonte da Telha (fig. 3.14 f) e o cabo Espichel;
- Uma área de profundidades superiores a 200 m, que contorna as cabeças dos canhões submarinos de Cascais e de Setúbal-Lisboa e a ligação destas estruturas à Montanha de Camões (cerca de 12 milhas náuticas a oeste do cabo da Roca).

Na figura 3.15, notam-se quatro estruturas de declive muito acentuado, que constituem as fronteiras entre as três áreas acima descritas, a saber:

- Uma linha que contorna a norte, e une, as cabeças dos canhões de Cascais e Setúbal-Lisboa e a Montanha de Camões, e que corta a AOI do cabo Espichel ao largo do cabo Raso;
- Uma linha zonal que acompanha a linha de costa na enseada da Macieira (fig. 3.14 g), na baía de Cascais, e que se estende do Cabo Raso à Ponta do Salmôdo (fig. 3.14 h);
- Uma linha zonal justa a norte da cabeça do canhão de Setúbal-Lisboa, e que estende da barra grande do Porto de Lisboa à praia da Fonte da Telha.

- Uma linha que acompanha a barra grande do Porto de Lisboa, e que se estende da barra do rio Tejo (fig. 3.14 i) para o largo ao longo do Baixo da Cabeça do Pato.

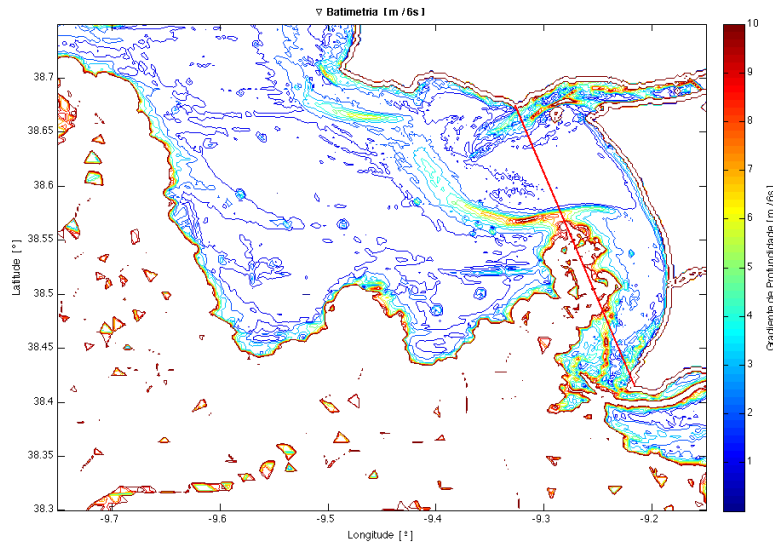


Figura 3.15: Declive da batimetria da AOI.

3.4. Análise harmónica: testes com diferentes métodos dos Mínimos Quadrados

As figuras 3.16 e 3.17 mostram, para o POI 702 (boia número 2 do porto de Lisboa), a comparação entre os três métodos de mínimos quadrados usados na análise harmónica da corrente de maré a partir das observações da corrente de superfície medidas por RADAR HF, para as constituintes harmónicas M2 e K1. A mediana $|\Delta U \Delta V|$ do POI 702 é 4,49 e situa-se no terço mais baixo das medianas da amostra $|\Delta U \Delta V|$ na AOI no período 2013-2016. O período considerado nesta comparação foi o mês de março de 2015 por compreender a maré equinocial vernal, e nesse ano, o momento em que o sol e a lua se alinharam sobre o equador, muito perto do perigeu lunar (ver secção 2.4, na página 19). Esta conjuntura astronómica geradora de grandes amplitudes de maré em 2015 foi a mais favorável, no período de 2013 a 2017, à indução de extremos de corrente de maré por forçamento astronómico.

Na comparação dos resultados da análise harmónica da M2 por MMQ, e MMQP com função de ponderação *cauchy* (Cauchy) e *cauchy* modificada (CQAL) (ver figura 3.16), nota-se, para todos os parâmetros comparados, que o MMQP com função de ponderação *cauchy* modificada reduz a amplitude dos valores extremos, sem oscilar o valor central, melhorando assim a solução.

Na comparação dos resultados da análise harmónica da K1 por MMQ, e MMQP com função de ponderação *cauchy* e *cauchy* modificada (ver figura 3.17), nota-se, para todos os parâmetros comparados, que o MMQP com função de ponderação *cauchy* modificada reduz a amplitude dos valores extremos, em especial na velocidade do semieixo-maior, na inclinação da elipse e na fase. Nota-se que o valor central oscila consoante o método usado na análise harmónica.

Notou-se, na AOI, que, quando $|\Delta U \Delta V| \leq 1$, a solução MMQP CQAL aproxima-se da solução MMQ. Ao passo que, quando $|\Delta U \Delta V| \geq 20$, a solução MMQP CQAL melhora muito os intervalos de confiança quando comparada com as soluções MMQ e MMQP Cauchy.

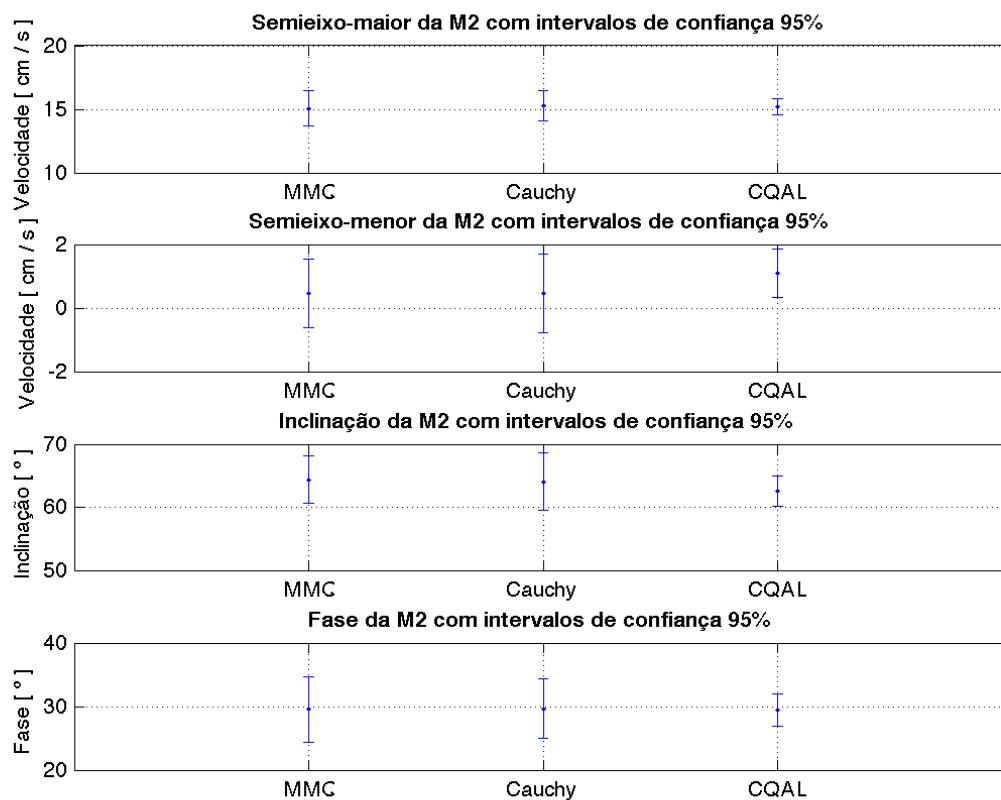


Figura 3.16: Comparação dos resultados da análise harmónica da M2 por MMQ, e MMQP com função de ponderação cauchy e cauchy modificada (CQAL) (maré equinocial de março de 2015 no POI 702).

Notou-se, ainda, que, em muitos casos em que $|\Delta U \Delta V| \geq 1$, o MMQP não resolve o sistema de equações da análise harmónica devido à não convergência da solução na função *robustfit* do MATLAB.

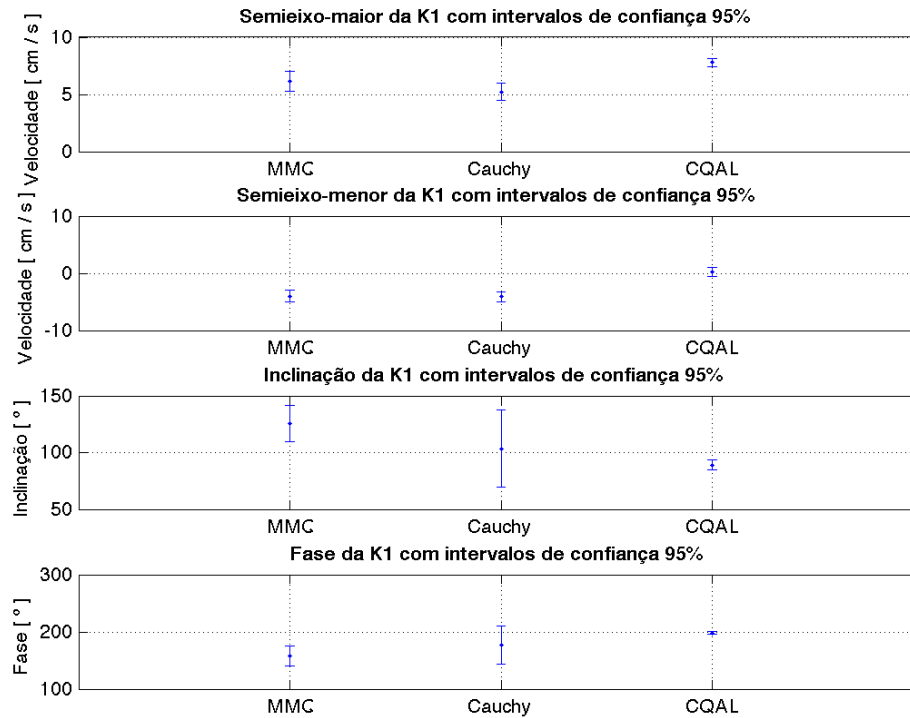


Figura 3.17: Comparação dos resultados da análise harmónica da K1 por MMQ, e MMQP com função de ponderação cauchy e cauchy modificada (CQAL) (maré equinocial de março de 2015 no POI 702).

3.5. Estatística direcional da corrente de maré

A tabela 3.1 mostra o valor da norma do vector médio das fases, r , (ver secção 2.7) das principais constituintes harmónicas da corrente de maré, calculado para as lunações dos anos 2014 e 2015, com indicação, a negrito, dos POI com menor e maior dispersão angular da fase por constituinte harmónica. A sétima lunação de 2014 foi removida do cálculo da norma do vector médio das fases, por a série de observação do RADAR HF respectiva apresentar muitas interrupções, o que gerou muita incerteza no cálculo da fase das constituintes harmónicas nesta lunação.

Tabela 3.1: Norma do vector médio das fases por constituinte harmónica.

POI	M2	S2	K1	O1	M4	MS4	M6
87	0.66	0.33	0.24	0.02	0.11	0.20	0.31
426	0.15	0.15	0.19	0.07	0.06	0.18	0.25
575	0.21	0.51	0.25	0.14	0.36	0.16	0.09
588	0.91	0.79	0.33	0.08	0.77	0.12	0.16
758	0.94	0.86	0.40	0.34	0.91	0.88	0.51
789	0.98	0.96	0.46	0.25	0.49	0.76	0.88
802	0.71	0.63	0.39	0.19	0.30	0.13	0.07

Nota-se na tabela 3.1 que o POI 789 é o mais coerente em todas as constituintes representadas, à excepção da sub-harmónica M4. O POI 426 é o menos coerente nas correntes de maré semi-diurna e da K1. As constituintes harmónicas semi-diurnas mostram elevada coerência (máximo 0.98), o que não se verifica nas correntes de maré diurnas cuja norma do vector médio nunca supera os 0.46. Merecem

especial realce as sub-harmônicas M4, MS4 e M6 cujos máximos da norma do vector médio, nos POI 588 e 789, superam entre 30 e 50% os valores desta norma nas correntes de maré diurnas. Nas áreas de maior profundidade, representada pelos POI 87 e 802, todas as constituintes harmônicas evidenciam, de modo consistente, uma redução da norma do vector médio entre 30 a 65%.

As figuras 3.18 a 3.19 mostram a dispersão angular da fase das constituintes harmônicas M2 e K1 nos POI 426 e 789 – os pontos da AOI com menor e maior valor desta medida estatística nas lunações de 2014 e 2015. A norma e o ângulo dos vectores representados são, para a constituinte harmônica indicada no título do gráfico, respectivamente, a dimensão do semieixo maior da elipse de corrente de maré e a fase.

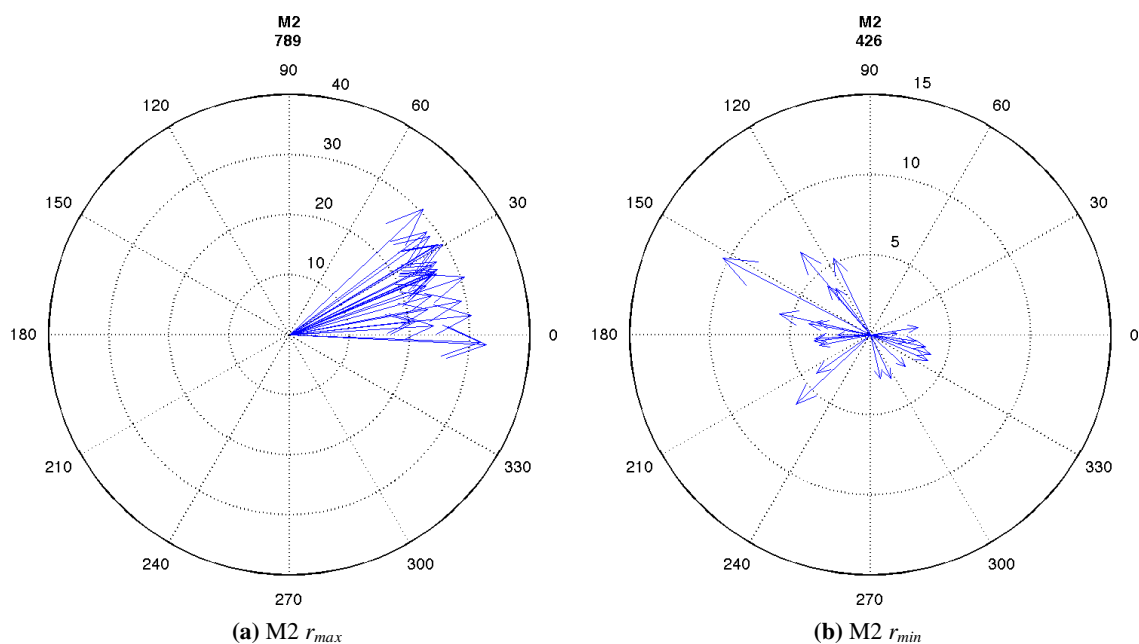


Figura 3.18: Pontos com menor (a) e maior (b) dispersão angular da fase da M2 (lunações 2014 e 2015). A norma e o ângulo dos vectores representados são, para a constituinte harmônica indicada no título do gráfico, respectivamente, a dimensão do semieixo maior da elipse de corrente de maré e a fase. A magnitude do vector é expressa em cm/s.

Na figura 3.18a nota-se que a fase da M2 no ponto 789 da AOI se concentra em torno de um valor médio com pouca dispersão, bem como a velocidade sobre o semieixo maior da elipse da corrente de maré M2 se mostra coerente nas lunações de 2014 e 2015. Tal comportamento não se verifica no ponto 426 da AOI, onde, como mostra a figura 3.18b, quer a fase quer a velocidade sobre o semieixo maior evidenciam grande incoerência.

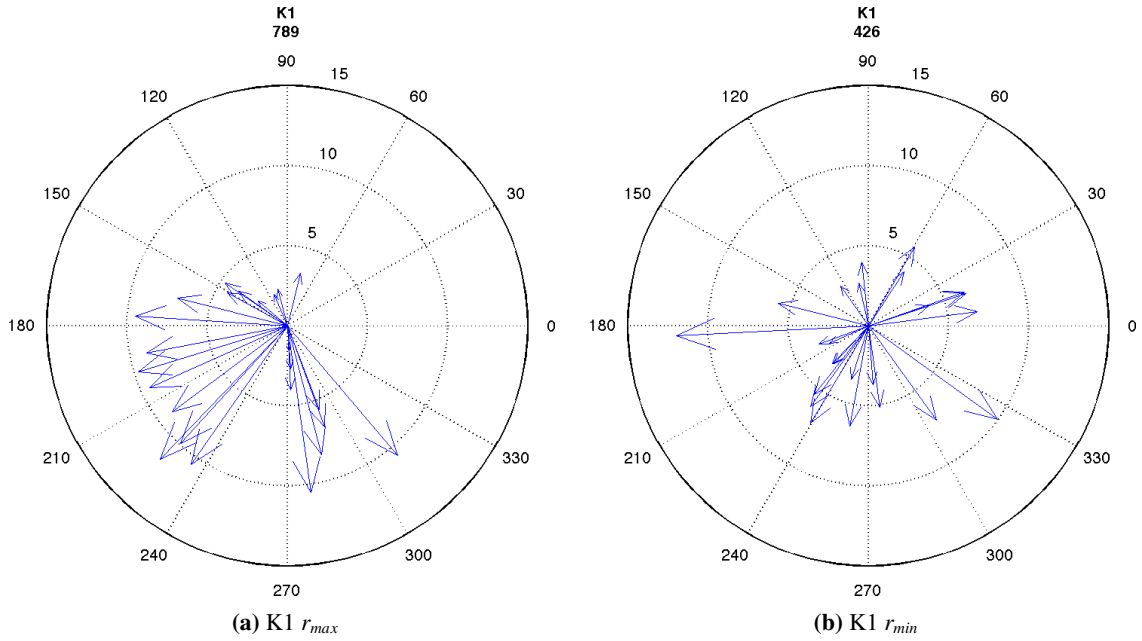


Figura 3.19: Pontos com menor e maior dispersão angular da fase da K1 (lunações 2014 e 2015).

Na figura 3.19 nota-se que, em ambos os pontos, quer a fase quer a velocidade sobre o semieixo maior da K1, evidenciam grande incoerência, nas lunações de 2014 e 2015.

As figuras 3.20 a 3.21 mostram a variabilidade espacial, na AOI, da dispersão angular da fase, medida pelo parâmetro r definido na equação 2.7, das constituintes harmônicas M2 e K1, respectivamente.

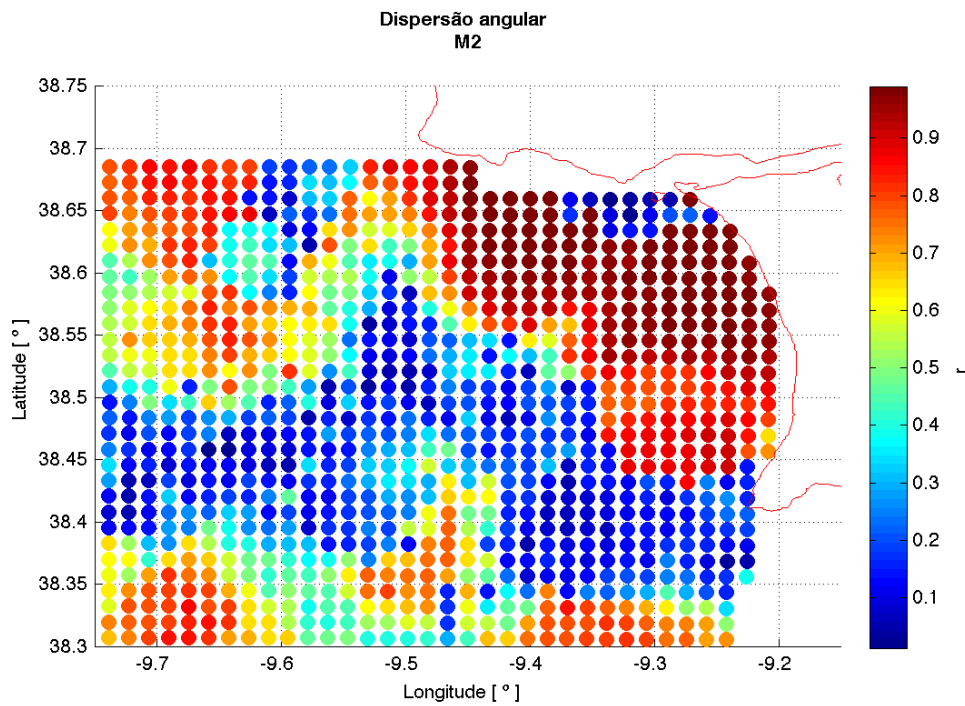


Figura 3.20: Dispersão angular das fases da M2 (lunações 2015).

A figura 3.20 mostra que a fase da M2 é muito coerente na zona de profundidade inferior a 150 m. Mostra ainda que, a corrente de maré desta corrente semi-diurna, na cabeça do canhão de Cascais, é mais coerente do que nas áreas vizinhas, especialmente nas de menor profundidade.

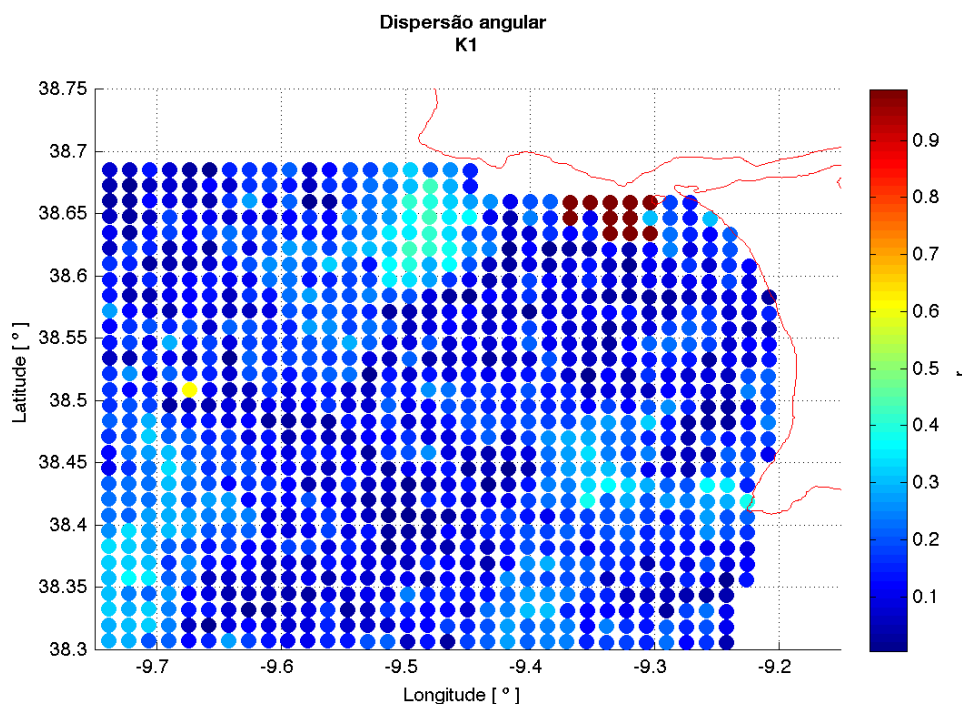


Figura 3.21: Dispersão angular das fases da K1 (lunações 2015).

A figura 3.21 mostra que a fase da K1 é, em geral, muito incoerente em toda a AOI. Nota-se que numa área de cerca de 3 milhas náuticas quadradas a sul do cabo Raso, bem como numa linha zonal ténue ao largo do cabo Espichel, a fase da K1 é ligeiramente mais coerente. De acordo com Alcoforado (1987) no seu estudo dos regimes diários dos ventos estivais na região de Lisboa, o vento tende a intensificar a sua velocidade juntos aos cabos, logo melhorando a coerência da sua componente periódica diurna.

3.6. Da previsão da corrente de maré

A figura 3.22 compara a diferença entre a direção e velocidade prevista da corrente de maré com a direção e velocidade do vento, para a maré equinocial vernal de 2015, no POI 702. Nota-se que os picos de erro da previsão coincidem com o picos da intensidade do vento e da direção no quadrante norte (convenção oceanográfica).

A figura 3.23 mostra o espectro da corrente residual em março de 2015 (maré equinocial vernal), no POI 702. Nota-se um pico de energia nas ondas longas nos três espectros: componente zonal, meridional e corrente total. Na componente meridional, nota-se um segundo pico de energia nas ondas semidiurnas (velocidade angular entre 25 e 30 °/hora).

A figura 3.24 mostra a análise de onduletas da corrente residual da maré equinocial vernal de 2015, no POI 702. Nota-se um primeiro pico de energia logo no início do período, e um segundo pico de energia no início da segunda metade do período.

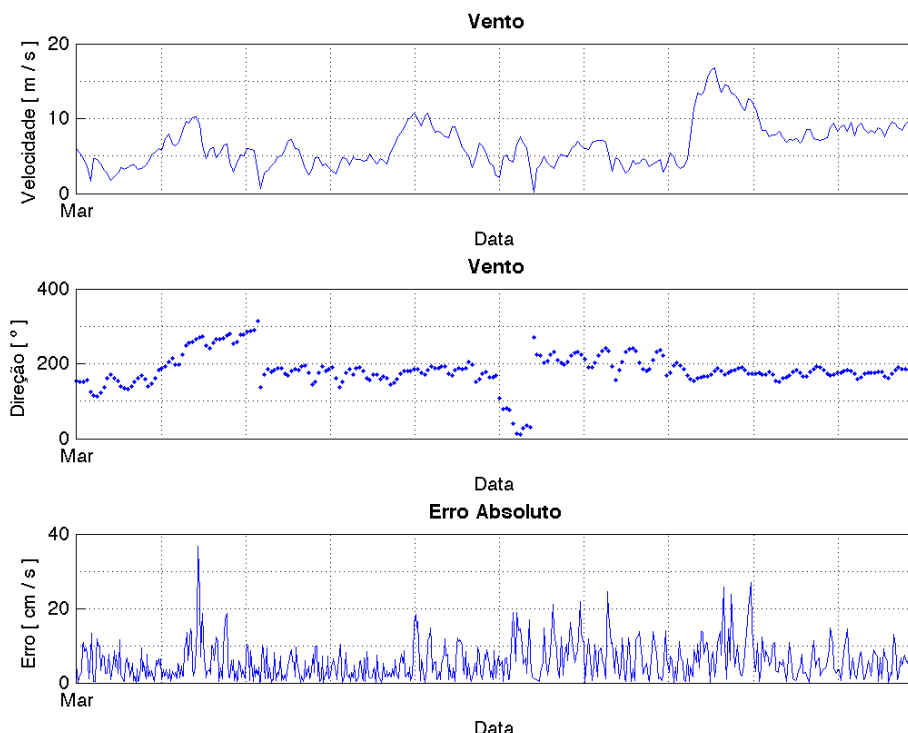


Figura 3.22: Comparação do erro da previsão da corrente de maré com a direção e velocidade do vento (maré equinocial vernal de 2015).

A figura 3.25 compara a previsão, para abril de 2015, da corrente de maré no POI 702 com a altura da maré referida ao marégrafo de Cascais.

Nota-se na figura 3.25 que a curva da velocidade máxima da corrente tende a comportar-se como a curva da altura de maré, sincronizando os seus extremos, como explicado pela análise teórica prévia.

A figura 3.26 mostra a diferença temporal entre as previsões, para abril de 2015, da corrente de maré no POI 821 (ponto próximo da boia número 1 do porto de Lisboa, no cruzamento da linha que une os faróis de São Julião e do Bugio (entre-torres) e a barra grande do porto de Lisboa) e da altura de maré (referida ao marégrafo de Cascais).

Nota-se na figura 3.26 um desfasamento em tempo de cerca de 2 horas e 30 minutos entre os extremos da altura da maré e a velocidade da corrente de maré, como explicado pela análise teórica prévia.

Os dados que se representaram nas figuras 3.25 e 3.26 garantem a informação de tempo, de velocidade e direção da corrente suficiente para publicação em Tabelas de Corrente de Maré. As Tabelas de Corrente de Maré são um dos produtos operacionais do sistema de previsão em estudo nesta dissertação.

As figuras 3.27 e 3.28 mostram, respectivamente, as elipses das constituintes harmónicas M2 e K1 da corrente de maré na AOI, calculada com a série anual de 2015.

Nota-se que a corrente de maré M2 alinha paralela aos eixos dos canhões submarinos e do canal do rio Tejo, e aos degraus mais acentuados na batimetria da AOI. A corrente de maré K1 alinha, com predominância, no eixo norte-sul, em toda a AOI, com exceção na área de profundidades entre os 75 m e os 150 m, que faz a transição entre a linha de costa e os canhões submarinos, onde alinha paralela à batimetria.

A figura 3.29 compara a energia cinética das constituintes harmónicas M2 e K1 da corrente de maré na AOI.

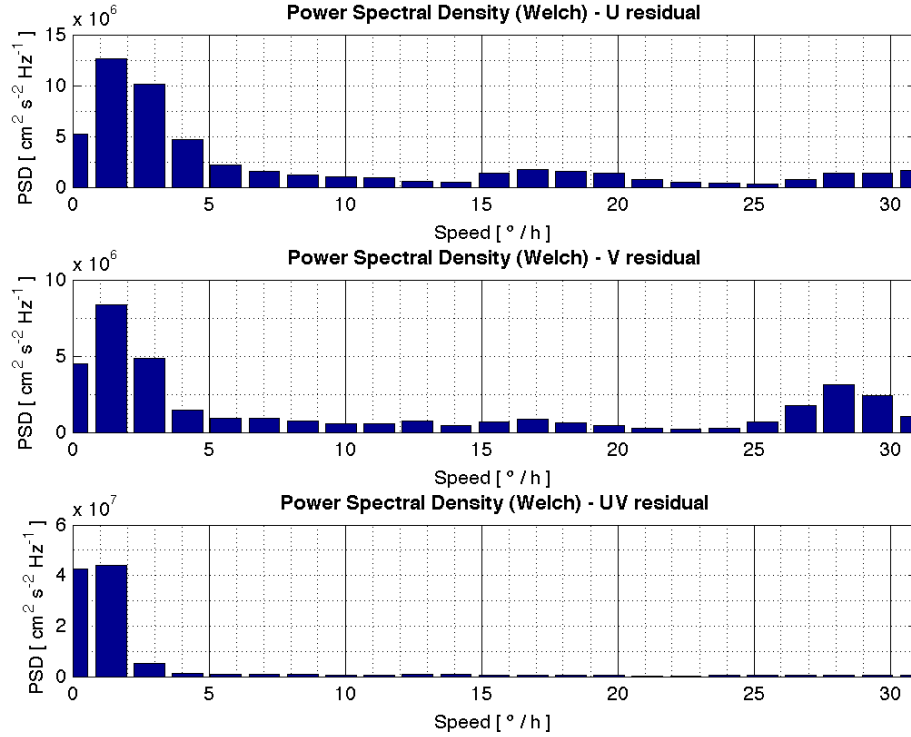


Figura 3.23: Densidade espectral de potência (Welch) da corrente residual no POI 702 (maré equinocial vernal de 2015).

Nota-se que a energia cinética da maré semidiurna M_2 se intensifica junto à foz do rio Tejo, onde se intensifica a descarga da pluma estuarina do rio. A energia cinética da maré diurna K_1 intensifica-se junto ao cabos Raso e Espichel, muito provavelmente evidenciando que existe uma forte contribuição do vento diurno na corrente de superfície e por consequência na corrente de maré.

A figura 3.30 mostra, na AOI, o número de forma da corrente de maré F : a razão da soma dos semieixos maiores das elipses de corrente de maré das constituintes harmónicas diurnas e semidiurnas (ver equação 3.1).

$$F = \frac{(O_1 + K_1)}{(M_2 + S_2)} \quad (3.1)$$

Nota-se que o número de forma não aparenta ser coerente com a teoria, evidenciando zonas de corrente de maré semi-diurna, diurna e mista, como esperado da análise individual das suas componentes diurna K_1 e semidiurna M_2 .

A figura 3.31a mostra a velocidade máxima da corrente de maré em águas vivas na AOI. A velocidade máxima em águas vivas acontece quando as quatro principais constituintes harmónicas estão em conjugação de fase, e estimou-se por:

$$(M_2 + S_2) + (K_1 + O_1) \quad (3.2)$$

A figura 3.31b mostra o limite inferior da velocidade máxima da corrente de maré em águas mortas na AOI. Este limite acontece quando as quatro principais constituintes harmónicas estão em oposição de fase, e estimou-se por:

$$(M_2 - S_2) + (O_1 - K_1) \quad (3.3)$$

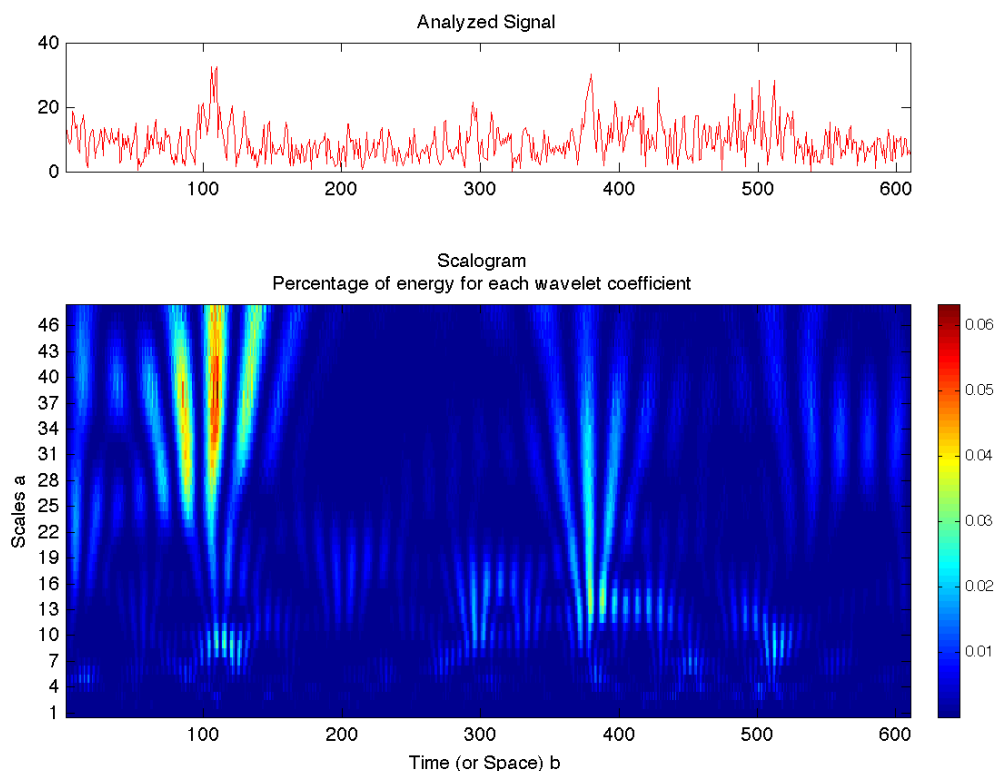


Figura 3.24: Análise de ondulas da corrente residual da maré equinocial vernal de 2015, no POI 702.

Nota-se que em ambos os casos (águas vivas e águas mortas) a corrente de maré tem o seu máximo junto à foz do rio Tejo, e junto aos cabos Raso e Espichel. Quando em águas mortas, o intervalo de velocidade é mais curto, permitindo distinguir algumas áreas representativas da influência do regime de ventos e hidrodinâmica da pluma estuarina do rio Tejo.

A figura 3.32 mostra a diferença de fase entre as constituintes harmónicas (M2 e K1) da corrente de maré e da altura de maré. As constituintes harmónicas da altura da maré são as publicadas pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa, em 2015, para o porto de Cascais.

Nota-se na figura 3.32a o contributo da hidrodinâmica da pluma estuarina do rio Tejo na maré semi-diurna M2, com a diferença de fase extremada na foz do rio.

Nota-se na figura 3.32b o contributo do regime de ventos na maré diurna K1, com a diferença de fase extremada na zona entre cabos mais exposta ao vento. A área influenciada pelo regime de ventos é maior, quando comparada com a área influenciada pela descarga fluvial, como esperado da revisão da literatura feita, em especial (Alcoforado, 1987).

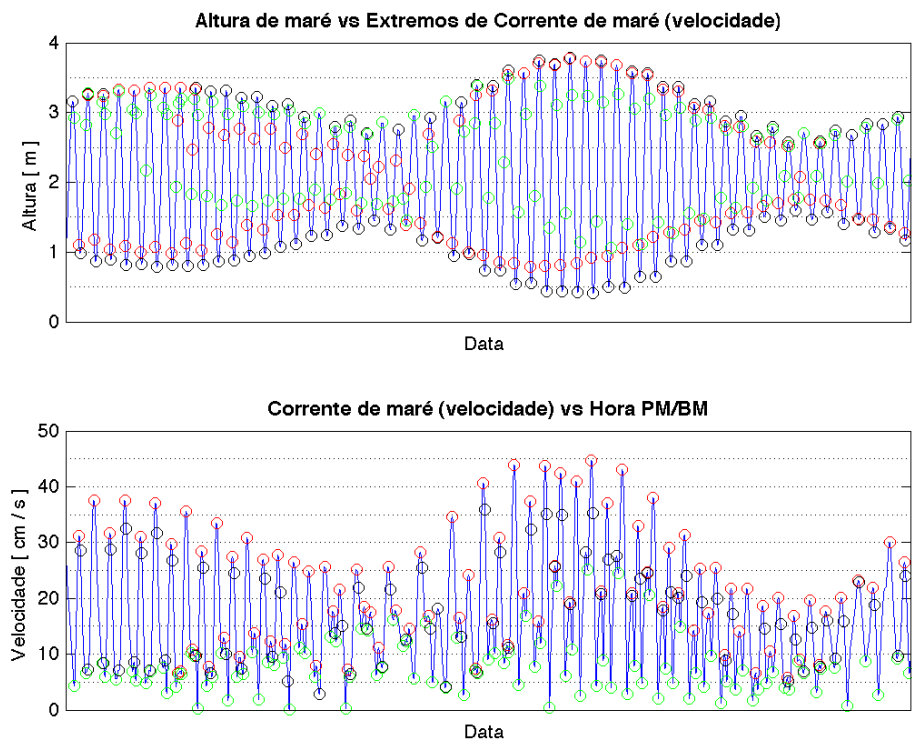


Figura 3.25: Comparação das previsões da corrente (POI 702) e da altura da maré (Cascais), para abril de 2015. As circunferências a preto, encarnado e verde representam, respetivamente, os extremos da altura de maré (baixa e preia-mar, a velocidade máxima da corrente de maré e a velocidade mínima da corrente de maré.

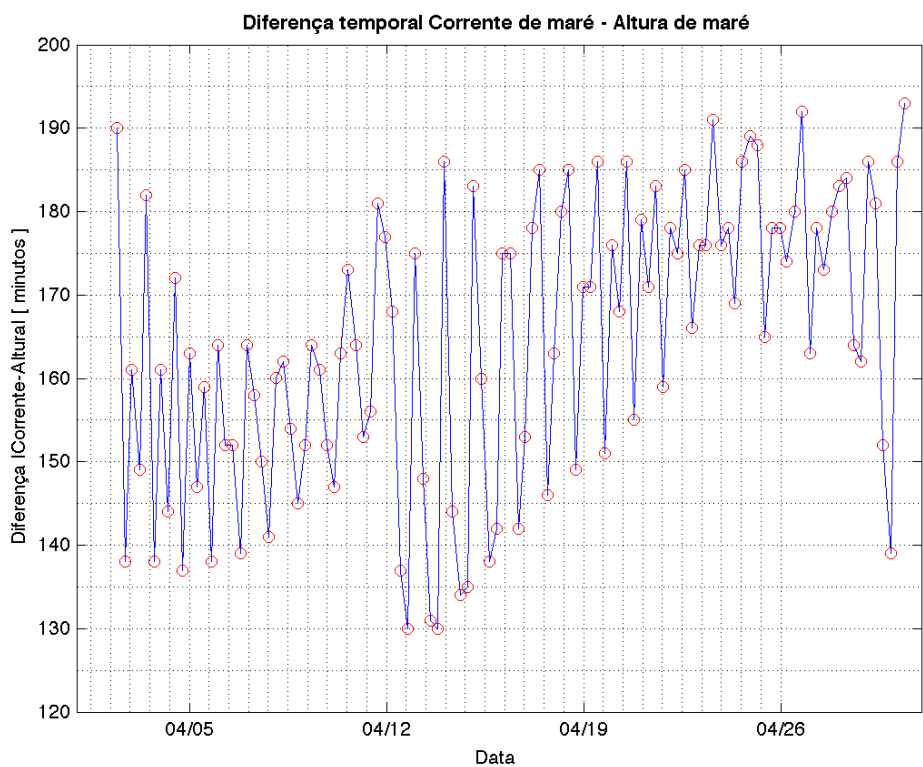


Figura 3.26: Diferença temporal entre corrente e altura de maré no POI 821 (abril de 2015). As circunferências a encarnado representam o instante da velocidade máxima da corrente de maré no POI 821.

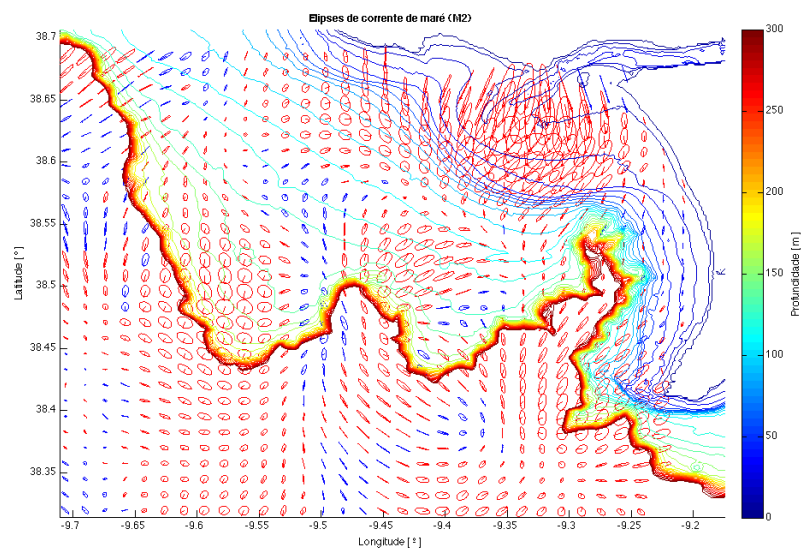


Figura 3.27: Elipses da corrente de maré semidiurna M2 (2015), sobre a batimetria.

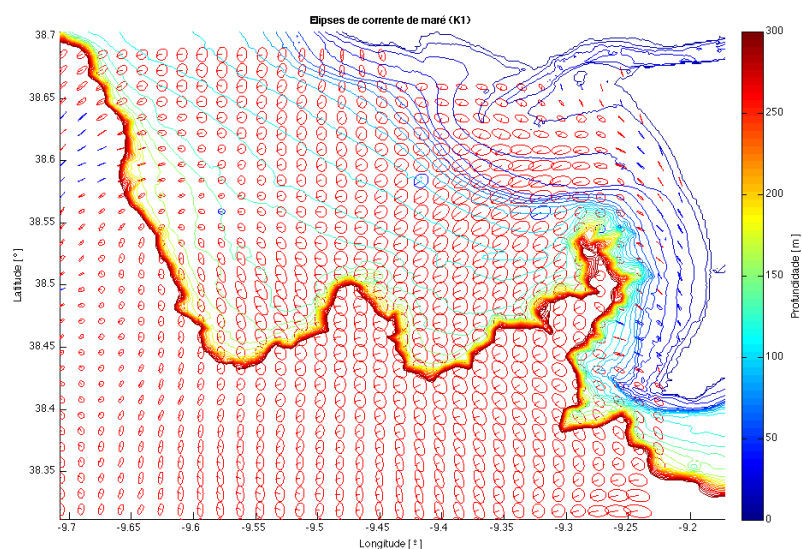


Figura 3.28: Elipses da corrente de maré diurna K1 (2015), sobre a batimetria.

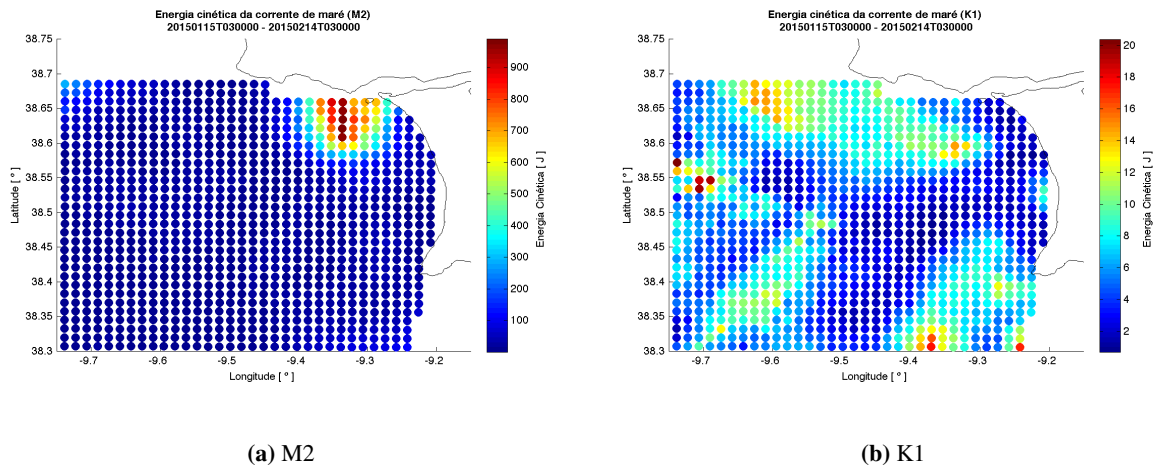


Figura 3.29: Energia cinética da corrente de maré semidiurna M2 e diurna K1 (2015).

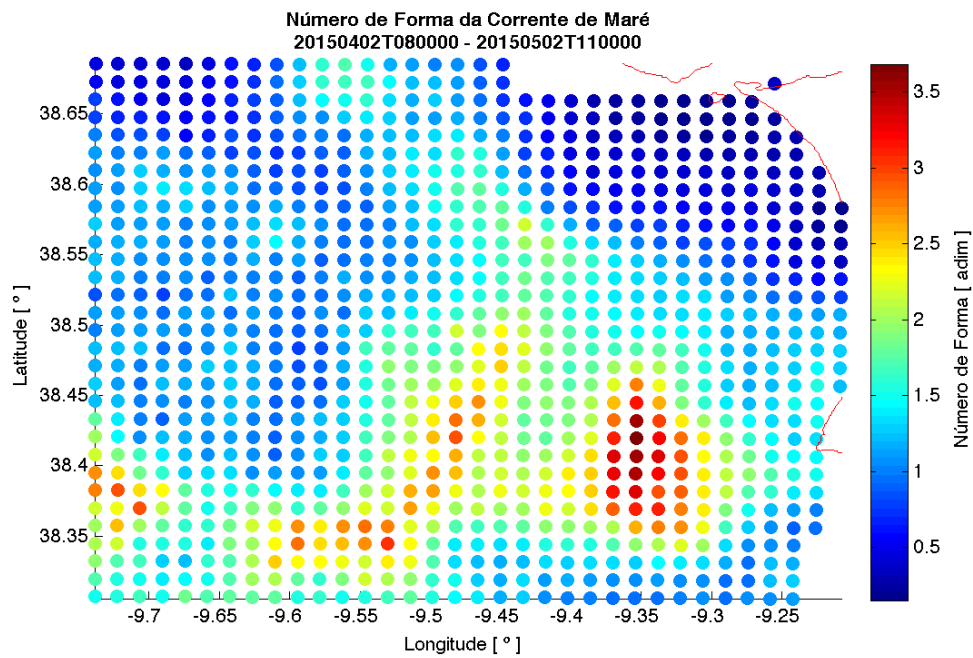
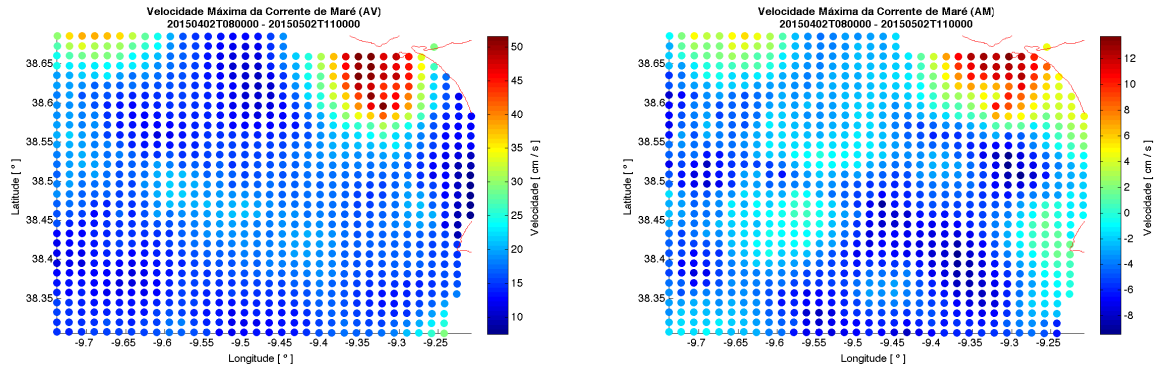
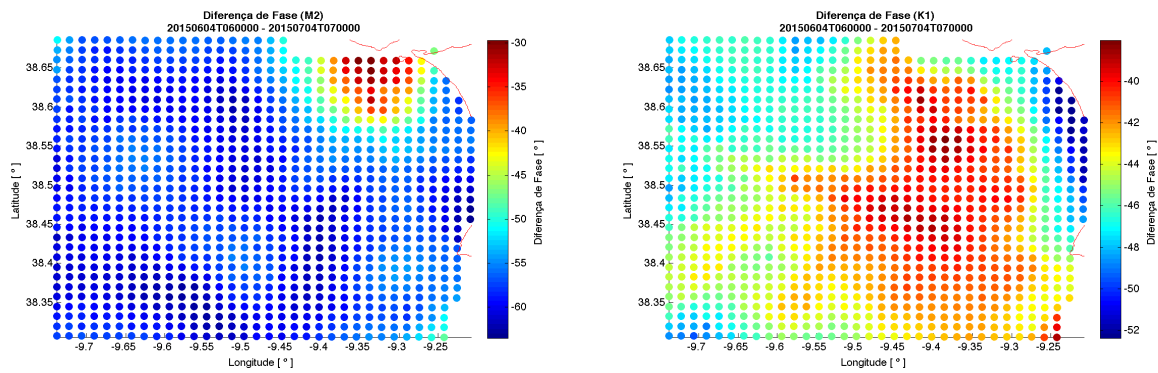


Figura 3.30: Número de forma da corrente de maré na AOI (abril de 2015). A maré é considerada semidiurna, mista e diurna, se o número de forma é, respectivamente, inferior a 0.25, entre 0.25 e 3, e superior a 3.



(a) Velocidade máxima da corrente de maré em águas vivas. (b) Limite inferior da velocidade máxima da corrente de maré em águas mortas.

Figura 3.31: Comparação da velocidade da corrente de maré em águas vivas e em águas mortas na AOI (abril de 2015).



(a) M2

(b) K1

Figura 3.32: Diferença de fase entre as constituintes harmônicas M2 e K1 da corrente de maré e da altura de maré na AOI (2015).

Capítulo 4

Conclusões

Vários aspetos da corrente de maré na área entre o cabo Raso e o cabo Espichel são apresentados no capítulo 3, a partir de um acervo extensivo de observações da corrente de superfície medida pelo sistema RADAR HF São Julião – Espichel entre 2012 e 2017.

Apresentam-se, agora, os aspetos das observações que se consideram relevantes para a compreensão da corrente da maré e da sua previsão operacional na AOI.

O sistema de RADAR HF mede a corrente à superfície, sem perfilar a corrente em profundidade, todavia em regimes de corrente de maré intensa, esta não parece ser uma limitação relevante para o seu estudo a partir da análise harmónica, como se nota no trabalho de Howarth et al. (2007), em que as constituintes harmónicas da maré calculadas a partir de medições de RADAR HF comparam bem com as constituintes calculadas a partir de medições com perfiladores de corrente.

A análise harmónica da corrente de superfície com o método dos mínimos quadrados ponderados com o desvio padrão normalizado das componentes zonal e meridional das medições da corrente medida pelo sistema RADAR HF São Julião – Espichel reduziu o intervalo de confiança comparado quer com o resultante da análise harmónica com o método dos mínimos quadrados ordinários, quer com o resultante da análise harmónica com o método dos mínimos quadrados ponderados com a função de pesos *cauchy*, como proposta por Codiga (2011).

A redução do intervalo de confiança com o método dos mínimos quadrados ponderados com o desvio padrão normalizado das componentes zonal e meridional da corrente medida mostra quão promissor pode ser este método se devidamente parametrizado e empiricamente validado.

Esta redução do intervalo de confiança pode dever-se ao enfraquecimento da influência das medições das componentes da corrente de superfície medida com maior desvio padrão, logo menos representativas da corrente de superfície real, no ajuste robusto da análise harmónica da corrente medida.

A principal limitação do MMQP é a pontual não resolução de pontos de interesse por não convergência da solução numérica.

Da análise dos gráficos polares das constituintes harmónicas (ver figuras 3.18 a 3.19), conclui-se que nos períodos mais curtos (24h, 48h e 72h) as constituintes harmónicas são muito incoerentes, em especial a principal diurna (K1). Nos períodos de análise mais longos as constituintes principais semidiurnas (M2 e S2) são muito coerentes quer em fase quer em amplitude, sendo as principais diurnas (K1 e O1) muito incoerentes, principalmente em fase.

A incoerência das principais constituintes harmónicas diurnas pode dever-se à contaminação da corrente de superfície pela corrente induzida pelo vento. A indução de corrente pelo vento é um fenómeno não determinista, logo não harmónico, que gera erro de ajuste do modelo quando se aplica a análise harmónica às medições da corrente de superfície.

Da análise do mapa da dispersão angular da M2 conclui-se que o erro na análise harmónica aumenta com a diminuição da amplitude da maré semidiurna. Esta relação entre o erro e a amplitude deve-se à grande sensibilidade da análise harmónica à amplitude. Quando se compara a batimetria com o mapa de dispersão angular da M2 conclui-se que a dispersão se associa à existência dos degraus batimétricos da AOI.

Da análise combinada dos mapas de elipses de fase da M2 conclui-se que a coerência de fase é inversamente proporcional à excentricidade da elipse, o que se pode explicar pela relevância da dimensão do semieixo menor da elipse no comportamento da fase: numa corrente rotativa a variação da fase é mais demarcada, ao passo que numa corrente alternada a fase inverte de modo abrupto.

Da análise do mapa de elipses da M2 conclui-se que, nas condições típicas de inverno em que a coluna de água é barotrópica e a corrente, a exceção das fronteiras de superfície e fundo, apresenta um padrão constante em profundidade (Vitorino et al., 2002), a corrente de maré semidiurna M2 tende a alinhar-se com a batimetria, note-se o alinhamento quase perfeito do semieixo principal das elipses com os eixos dos canhões submarinos de Cascais e de Lisboa-Setúbal. Este alinhamento deve-se ao comportamento de onda de águas rasas da onda M2.

Da análise dos mapas de número de forma conclui-se que a corrente de maré na AOI é predominantemente semidiurna, tendo esta frequência mais energia cinética junto à foz do rio Tejo. Na zona entre o Cabeço do Pato e os canhões submarinos de Cascais e Lisboa-Setúbal, a corrente de maré é semidiurna, embora aqui se note mais energia cinética diurna do que junto à foz, energia essa que aumenta com o afastamento da costa. Esta variação da energia cinética diurna pode dever-se mais à contaminação das condições meteo-oceanográficas, especialmente a direção e intensidade do vento, e à sua capacidade de indução de corrente de superfície com frequência diurna, semelhante à periodicidade das constituintes diurnas da maré (K1, O1, S1), associada ao ciclo diurno solar e ao consequente regime de brisa (Alcoforado, 1987), e não tanto à indução pela morfologia da plataforma continental de uma onda de maré não divergente, como no caso da corrente de maré diurna extraordinariamente intensa que se sente ao largo das Ilhas Britânicas (Cartwright, 1969).

Da análise do mapa de diferença de fase da principal constituinte semidiurna (M2) conclui-se que na AOI existem dois regimes de corrente de maré: um regime estuarino hidráulico, junto à foz do rio Tejo, com a onda da maré canalizada pelo leito do rio de pequena escala não permitindo desenvolvimento inercial; e um regime geofísico ao largo, com a onda de maré a propagar-se como uma onda de Kelvin numa bacia de profundidade finita.

A previsão operacional da corrente costeira na AOI, em particular da sua componente de maré, implica reconstruir o sinal da corrente a partir das constituintes calculadas na análise harmónica da corrente de superfície medida pelo sistema de RADAR HF São Julião – Espichel. Uma vez que as principais constituintes diurnas (K1 e O1) se mostram contaminadas pela corrente radiacional, não devem ser incluídas na reconstrução da corrente de maré, sem as distinguir das oscilações diurnas da corrente radiacional. Logo, o maior desafio que se põe diante da previsão operacional da corrente costeira na AOI, a par das pontuais falhas, temporais e espaciais, das medições do sistema de RADAR HF São Julião – Espichel, é a filtragem da corrente de superfície radiacional não periódica de forçamento externo. Esta filtragem permite o cálculo das principais constituintes diurnas da corrente de maré, melhorando, assim, a reconstrução do sinal desta corrente, e consequentemente a previsão operacional da corrente costeira.

Um segundo desafio que se põe diante da previsão operacional da corrente costeira na AOI é a maior incerteza das medições na linha de base do sistema de RADAR HF (Lipa, 2003), que no caso do sistema São Julião – Espichel cobre toda a área entre a linha de costa do Bugio ao cabo Espichel e a linha que une as duas estações RADAR HF do sistema, abrangendo toda a área balnear da Costa da Caparica.

A principal limitação desta investigação consiste na exclusiva análise de dados do sistema RADAR HF São Julião – Espichel, sem validação das medições da corrente de superfície com outra tecnologia.

O ponto forte desta investigação é o desenvolvimento da metodologia da análise harmónica da corrente de superfície com o método dos mínimos quadrados ponderados com o desvio padrão normalizado das componentes zonal e meridional das medições da corrente medida pelo sistema RADAR HF.

No fecho desta dissertação deixam-se as seguintes propostas de direção para novas investigações, que se julga poder melhorar os resultados atuais:

- Afinar a parametrização da função de ponderação proposta nesta investigação com a experimentação empírica com outra tecnologia de medição de corrente, por exemplo correntómetros eularianos, na AOI.
- Comparar as medições RADAR HF com medições eularianas por ADCP ou outros correntómetros, e lagrangeanas por flutuadores derivantes (tipo Wavy).
- Estudar a periodicidade da brisa e comparar/distingui-la das constituintes harmónicas diurnas, por modelação da corrente radiacional diurna. Melhorar o critério da filtragem do vento na escolha dos períodos a submeter à análise harmónica, para minimizar a contaminação diurna da corrente de maré pela corrente induzida pelo vento, e assim melhorar a coerência das principais constituintes diurnas (K1 e O1), e consequentemente melhorar a exatidão da previsão da corrente de maré.
- Prever de modo operacional apenas a corrente semidiurna, que não apresenta contaminação do sinal pela corrente periódica radiacional, e é, como se mostrou, a de maior intensidade, logo a que mais importa a quem navega na AOI.

Referências bibliográficas

- Alcoforado, M. J., 1987. Brisas estivais do Tejo e do Oceano na região de Lisboa. *Finisterra* 22 (43).
- Barrick, D. E., 2008. 30 years of CMTC and CODAR. In: *Current Measurement Technology*, 2008. CMTC 2008. IEEE/OES 9th Working Conference on. pp. 131–136.
- Berens, P., 2009. CircStat: a MATLAB toolbox for circular statistics. *J Stat Softw* 31 (10), 1–21.
- Bordeianu, C. C., Landau, R. H., Paez, M. J., 2009. Wavelet analyses and applications. *European Journal of Physics* 30 (5), 1049.
- Cartwright, D. E., 1969. Extraordinary tidal currents near St Kilda. *Nature* 223 (5209), 928–932.
- Castelao, R., Schofield, O., Glenn, S., Chant, R., Kohut, J., 2008. Cross-shelf transport of freshwater on the New Jersey shelf. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113 (C7).
- Chant, R. J., Glenn, S. M., Hunter, E., Kohut, J., Chen, R. F., Houghton, R. W., Bosch, J., Schofield, O., 2008. Bulge formation of a buoyant river outflow. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 113 (C1).
- Chapman, R. D., Graber, H. C., 1997. Validation of HF radar measurements. *Oceanography* 10 (2), 76–79.
- CODAR, 2013. SeaSonde Radial Site Release 7 - LLUV 1.12 File Format. CODAR Ocean Sensors, Ltd.
- Codiga, D. L., 2011. Unified tidal analysis and prediction using the UTide Matlab functions. Graduate School of Oceanography, University of Rhode Island Narragansett, RI.
- ECMWF, 2018. ERA-Interim.
- Essen, H.-H., Gurgel, K.-W., Schlick, T., 2000. On the accuracy of current measurements by means of HF radar. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 25 (4), 472–480.
- Gurgel, K.-W., 1994. Shipborne measurement of surface current fields by HF radar. In: *OCEANS'94. Oceans Engineering for Today's Technology and Tomorrow's Preservation. Proceedings*. Vol. 3. p. III23.
- Gurgel, K.-W., Essen, H.-H., Kingsley, S. P., 1999. High-frequency radars: physical limitations and recent developments. *Coastal engineering* 37 (3), 201–218.
- Howarth, M. J., Player, R. J., Wolf, J., Siddons, L. A., 2007. HF radar measurements in Liverpool Bay, Irish Sea. In: *OCEANS 2007-Europe*. pp. 1–6.
- IOC, 2012. Technical Report on Scoping of Operational Oceanography. Tech. rep., Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris.

- Kim, S. Y., Cornuelle, B. D., Terrill, E. J., 2009. Anisotropic response of surface currents to the wind in a coastal region. *Journal of Physical Oceanography* 39 (6), 1512–1533.
- Kosro, P. M., 2005. On the spatial structure of coastal circulation off Newport, Oregon during spring and summer 2001 in a region of varying shelf width. *Journal of Geophysical Research C: Oceans*.
- Kudela, R. M., Horner-Devine, A. R., Banas, N. S., Hickey, B. M., Peterson, T. D., McCabe, R. M., Lessard, E. J., Frame, E., Bruland, K. W., Jay, D. A., others, 2010. Multiple trophic levels fueled by recirculation in the Columbia River plume. *Geophysical Research Letters* 37 (18).
- Lana, A., Marmain, J., Fernández, V., Tintoré, J., Orfila, A., 2016. Wind influence on surface current variability in the Ibiza Channel from HF Radar. *Ocean Dynamics*.
- Lipa, B., 2003. Uncertainties in SeaSonde current velocities. In: *Current Measurement Technology, 2003. Proceedings of the IEEE/OES Seventh Working Conference on*. pp. 95–100.
- Lipa, B., Barrick, D., 1983. Least-squares methods for the extraction of surface currents from CODAR crossed-loop data: Application at ARSLOE. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 8 (4), 226–253.
- Martins, L., Reis, J., 2007. Nível médio, maré e análise harmónica. 5.as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária.
- Paduan, J. D., Graber, H. C., 1997. Introduction to high-frequency radar: reality and myth. *Oceanography* 10 (2), 36–39.
- Paduan, J. D., Rosenfeld, L. K., 1996. Remotely sensed surface currents in Monterey Bay from shore-based HF radar (Coastal Ocean Dynamics Application Radar). *Journal of Geophysical Research: Oceans* 101 (C9), 20669–20686.
- Paduan, J. D., Washburn, L., 2013. High-frequency radar observations of ocean surface currents. *Annual review of marine science* 5, 115–136.
- Pugh, D., Woodworth, P., 2014. *Sea-level science: understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press.
- Rosenfeld, L., Shulman, I., Cook, M., Paduan, J., Shulman, L., 2009. Methodology for a regional tidal model evaluation, with application to central California. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 56 (3), 199–218.
- Rua, A., 2012. Wavelets em Economia. *Boletim Económico (Banco de Portugal)* 18 (2), 77–86.
- Rubio, A., Mader, J., Corgnati, L., Mantovani, C., Griffa, A., Novellino, A., Quentin, C., Wyatt, L., Schulz-Stellenfleth, J., Horstmann, J., Lorente, P., Zambianchi, E., Hartnett, M., Fernandes, C., Zervakis, V., Gorringe, P., Melet, A., Puillat, I., 2017. HF Radar Activity in European Coastal Seas: Next Steps toward a Pan-European HF Radar Network. *Frontiers in Marine Science*.
- Schmidt, R., 1986. Multiple emitter location and signal parameter estimation. *IEEE transactions on antennas and propagation* 34 (3), 276–280.
- Schureman, P., 1958. *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*. No. 98. US Government Printing Office.

- Service Hydrographique et Oceanographique de la Marine, 1968. Courants de marée. Dans La Manche et sur les côtes françaises de l'Atlantique. No. 550. Service Hydrographique et Océanographique de la Marine, Paris.
- Simon, B., 2013. Coastal Tides. Institut Océanographique, Fondation Albert 1er, Prince de Monaco.
- Teague, C. C., Vesecky, J. F., Fernandez, D. M., 1997. HF radar instruments, past to present. *Oceanography* 10 (2), 40–44.
- Thomson, R. E., Emery, W. J., 2014. Data analysis methods in physical oceanography. Newnes.
- Ullman, D. S., O'Donnell, J., Kohut, J., Fake, T., Allen, A., 2006. Trajectory prediction using HF radar surface currents: Monte Carlo simulations of prediction uncertainties. *Journal of Geophysical Research: Oceans* 111 (C12).
- Vitorino, J., Oliveira, A., Jouanneau, J. M., Drago, T., 2002. Winter dynamics on the northern Portuguese shelf. Part 1: physical processes. *Progress in Oceanography* 52 (2), 129–153.
- Weber, J. E., 1983. Steady wind-and wave-induced currents in the open ocean. *Journal of Physical Oceanography* 13 (3), 524–530.
- Wells, D., Beck, N., Delikaroglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E. J., Lachapelle, G., Langley, R. B., Nakiboglu, M., Schwartz, K. P., Tranquilla, J. M., others, 1986. Guide to GPS Positioning, Can. GPS Assoc., Fredericton, NB, Canada.
- Wyatt, L. R., 2007. Wave and tidal power measurement using HF radar. In: *Oceans 2007-Europe*. pp. 1–5.
- Yaremchuk, M., Sentchev, A., 2011. A combined EOF/variational approach for mapping radar-derived sea surface currents. *Continental Shelf Research* 31 (7), 758–768.